

Doktori/Ph.D. értekezés

Székely Péter

Fizika Doktori Iskola

Szeged

2009

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék

Doktori/Ph.D. értekezés

**Csillagok, csillaghalmazok és kisbolygók fizikai paramétereinek
meghatározása spektrofotometriai módszerekkel**

Szerző: Székely Péter, okl. csillagász

Témavezető/Konzulens:

Dr. Szatmáry Károly, egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem

Dr. Kiss L. László, posztdoktori ösztöndíjas, University of Sydney,
Ausztrália

2009

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	6
2. Elméleti háttér	8
2.1. A gömbhalmazok alapvető fizikai tulajdonságai	8
2.2. A gömbhalmazok vizsgálati módszerei	12
2.2.1. Fotometria	12
2.2.2. Spektroszkópia	20
2.3. Fizikai paraméterek meghatározása	20
2.4. A gömbhalmazok kinematikája	22
2.4.1. Árapály-hatások a halmazok külső régióiban	23
3. Az NGC 362 változócsillagai és halmazparaméterei	29
3.1. Bevezetés	29
3.2. Az adatfeldolgozás	31
3.3. Egymódusú RR Lyrae csillagok	33
3.4. Az RR Lyrae csillagok Fourier-analízise	40
3.5. Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagok	43
3.6. A szín-fényesség-diagram	45
3.7. Egyéb rövid periódusú változócsillagok	48
3.8. Következtetések	52
3.9. Megjegyzések az egyedi csillagokhoz	57
4. Gömbhalmazok multiobjektum-spektroszkópiai vizsgálata	61
4.1. Bevezetés	61
4.2. A megfigyelések és az adatfeldolgozás	63
4.3. Részletes eredmények	65
4.4. Jövőbeli tervek	71
4.5. Összefoglalás	72
5. Változócsillagok megfigyelései	74
5.1. Bevezetés	74
5.2. A GW UMa nagy amplitúdójú δ Scuti vizsgálata	74
5.2.1. Bevezetés	74
5.2.2. Megfigyelések	75
5.2.3. Eredmények	75
5.3. Az SZ Her fedési kettőscsillag analízise	78
5.3.1. Bevezetés	78
5.3.2. Megfigyelések és adatfeldolgozás	78
5.3.3. Eredmények	79

5.3.4. Összefoglalás	81
6. Kisbolygók fotometriai vizsgálata	83
6.1. Bevezetés	83
6.2. Megfigyelések és adatfeldolgozás	84
6.3. Eredmények	87
6.3.1. 469 Argentina	87
6.3.2. 531 Zerlina	88
6.3.3. 546 Herodias	89
6.3.4. 549 Jessonda	89
6.3.5. 697 Galilea	91
6.3.6. 756 Lilliana	91
6.3.7. 894 Erda	91
6.3.8. 1026 Ingrid	92
6.3.9. 1108 Demeter	94
6.3.10. 1170 Siva	94
6.3.11. 1270 Datura	96
6.3.12. 1286 Banachiewiczza	96
6.3.13. 1400 Tirela	98
6.3.14. 1503 Kuopio	98
6.3.15. 1506 Xosa	100
6.3.16. 1695 Walbeck	100
6.3.17. 2448 Sholokhov	100
6.3.18. 3682 Welther	102
6.3.19. 5349 Paulharris	103
6.3.20. 5690 1992 EU	103
6.3.21. 6510 Tarry	103
6.3.22. 7505 Furushu	106
6.3.23. 11436 1969 QR	106
6.4. Összefoglalás	108
7. Összefoglalás és tézispontok	110
7.1. Tudományos háttér	110
7.2. Kutatási módszerek	112
7.3. Tézispontok	112
8. A dolgozat angol nyelvű összefoglalása és tézispontok	115
8.1. Scientific background	115
8.2. Research methods	116
8.3. Results	117

9. Publikációk	119
9.1. Az értekezéshez felhasznált saját publikációk	119
9.2. Egyéb, az értekezéshez szorosan nem kötődő publikációk	121
10. Irodalomjegyzék	123
11. Köszönetnyilvánítás	131

1. Bevezetés

A PhD dolgozatom 2000 ősze és 2006 nyara között különböző távcsövekkel végzett csillagászati méréseimből származó eredményekre támaszkodik, bár az egymás után következő fejezetek nem tükrözik a vizsgálatok kronológiai sorrendjét. A mérések különböző égitest-típusokra irányulnak (kisbolygók, változócsillagok, gömbhalmazok), az eltérő jellegű megfigyelések (fotometriai, illetve spektroszkópiai módszerek) különböző megközelítést és ennek megfelelően különböző fizikai paraméterek meghatározását teszik lehetővé. A látszólag eltérő területek között összekötő kapcsolatot teremtenek az azonos vizsgálati módszerek. Másodéves egyetemi hallgató koromban kapcsolódtam be a Szegedi Tudományegyetemen folyó, a Naprendszer apró égitestjeinek vizsgálatát célul tűző kutatásokba. Rövidesen elkezdhettem az önálló mérések végzését a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es műszerével, amely mellett a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete piszkéstetői 60 cm-es Schmidt-távcsövét is használhattam. Az eredmények első bemutatása Tudományos Diákköri Konferenciák keretében történt. A kisbolygók fotometriai megfigyelése mellett változócsillagok CCD-s vizsgálati módszereivel is megismerkedtem a későbbiekben, a dolgozatomban bemutatott két változócsillag mintegy átmeneti objektumként is tekinthető a gömbhalmazokbeli változók felé. Értekezésem legfajszínűsabb kutatásai a gömbhalmazok vizsgálatára irányultak. Ezek során lehetőségem adódott külföldön található, nagyobb méretű és teljesítményű távcsövek és műszerek használatára. Két fejezet tartalmazza az ezirányú, fotometriai és spektroszkópiai méréseimből származó adatok feldolgozását. A vizsgálatokból kapott eredményeket több referált folyóirat-cikkben mutattam be az elmúlt évek során.

PhD értekezésem felépítése a következő. Az egyes fejezetek kisebb alfejezetekre tagolódnak, amelyek tartalmazzák a bevezetést, bemutatják a megfigyelések technikai hátterét, ismertetik a kapott eredményeket stb.

- Az elméleti összefoglalóban a gömbhalmazok kutatásának rövid történetét ismertettem, valamint részletesen kitérek a halmazok tulajdonságaira és asztrofizikai jelentőségére. Ezek mellett bemutatok néhány új - mind elméleti, mind obszervációs - eredményt, amelyekhez kötődően átfórmálódhat a gömbhalmazokról alkotott tudásunk jelentős része.
- A következő részben - amely dolgozatom legnagyobb terjedelmű fejezete - a Kis Magellán-felhő mellett látszó NGC 362 katalógusszámú gömbhalmaz fotometriai és spektroszkópiai eredményeit ismertetem, bemutatom többek között a már korábbról ismert, illetve új felfedezésű változócsillagok fénygörbéit, a halmaz szín-fényesség-diagramját, valamint az RR Lyrae csillagok analízisével és izokrónillesztéssel is megbecsülöm a halmaz fizikai paramétereit.

- Ezután 5 gömbhalmaz csillaginak radiálissebesség-analízisét mutatom be, amelyhez multiobjektum-spektroszkópai adatokat használtam fel. A méréseim fő célja az árapály nyúlványok és az esetleges rendszerszintű forgás jelenlétének kimutatása volt, dolgozatom ezen részében a forgásra vonatkozó eredményeket diszkutálom.
- Értekezésem következő fejezetében két különböző típusú változócsillag (az SZ Her Algol típusú fedési kettős és a GW UMa nagyamplitúdójú δ Scuti típusú pulzátor) fotometriai analízisét mutatom be.
- Dolgozatom utolsó részében 23 főövbeli kisbolygó forgási és alakparamétereire vonatkozó eredményeimet ismertetem. Ezek közül a legfontosabbak a 894 Erda, és a 3682 Welther, amelyek az esetleges kettősség jeleit mutatták, valamint a 469 Argentina, amelynek mozgása „bukdácsoló” lehet. A viszonylag fiatal, 1270 Datura nevű égitestet az eredményeim leközlése óta 8 méteres távcsővel is vizsgálták (Takato, 2008).
- Zárásként a tézispontok és az értekezés angol nyelvű összefoglalója található, amit az irodalomjegyzék és a köszönetnyilvánítás követ.

2. Elméleti háttér

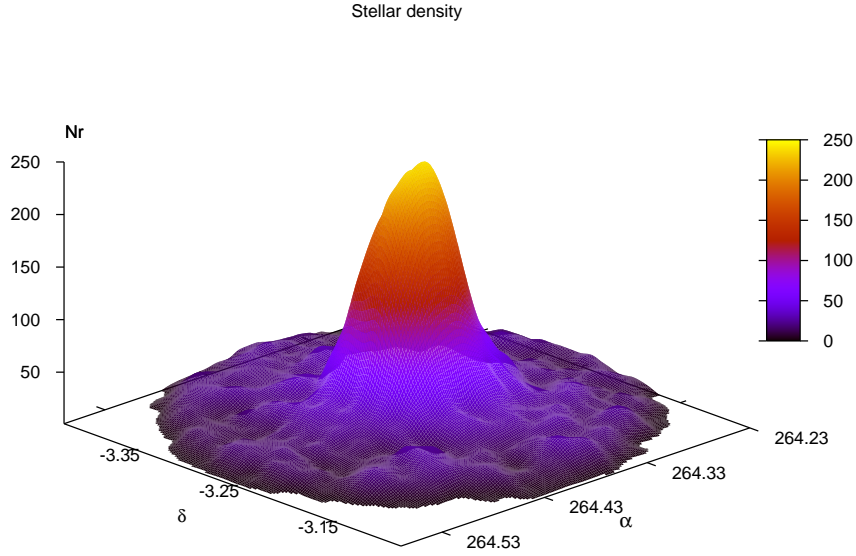
2.1. A gömbhalmazok alapvető fizikai tulajdonságai

A gömbhalmazok az Univerzum legidősebb objektumai közé tartoznak, többségük kora meghaladja a 10 milliárd évet. Koruk éveken keresztül heves vita tárgya volt, ugyanis némely halmaz idősebbnek adódott, mint az azokat tartalmazó Világegyetem, ami nyilvánvalóan képtelenség (Chaboyer, 2008). Gömbhalmazokat természetesen nem csupán a Tejútrendszerben figyelhetünk meg, hanem az extragalaxisokban is. A Tejútrendszerben annak centrumához közel is találtak ilyen objektumot, nagy részük azonban a külső tartományokban, a halóban található. Összességében körülbelül 150 galaktikus gömbhalmazt ismerünk (Siegel és mtsai, 2008), de az infravörös csillagászat fejlődésével elképzelhető, hogy újakat találunk, amelyek látóirányban vastag porfelhők takarásában helyezkednek el. Nagy elliptikus galaxisok mindazonáltal több ezer gömbhalmazt is tartalmazhatnak (Lee, 2008).

Pár szóban a gömbhalmazok megismeréséről. Jónéhányuk szabad szemmel is felismerhető, így azok régebbi idők óta ismertek. William Herschel a legközelebbi halmazok külső tartományait csillagokra tudta bontani, így felmerült benne, hogy más ködös objektumok is összeolvadó csillagok képét mutatják. Messier XVIII. századi katalógusában 29 gömbhalmaz szerepel, a többi NGC, illetve IC katalógusbeli sorszámot visel, valamint a múlt század derekán a Palomar-hegyi fotografikus felmérés újabb, alacsony felületi fényességű objektumokat adott hozzá (Pal 1-13 elnevezéssel) a mára szinte teljes tejútrendszerbeli gömbhalmaz listához. Harlow Shapley a halmazok térbeli helyzetének tanulmányozásával tett sokat hozzá galaxisunk szerkezetének megértéséhez: kutatásai alapján - a gömbhalmazok aszimmetrikus eloszlásából következően - úgy találta, hogy Naprendszer körülbelül 50000 fényévre fekszik a Tejútrendszer középpontjától, ami a Sagittarius csillagképben helyezkedik el.

A gömbhalmazok neve is utal a halmazok térbeli sajátosságaira: a csillagok gömbszimmetrikus térbeli eloszlásúak, számuk a néhány ezertől a legnagyobb galaktikus halmazok (ω Cen, 47 Tuc) esetében akár egymillióig is terjedhet. Jelenlegi ismereteink szerint a halmazokat alkotó csillagok közelítőleg egyszerre születnek, így koruk és kémiai összetételük megegyezik, azonban a különböző tömeg miatt eltérő evolúciós útvonalat járnak be. A csillagok térbeli sűrűsége a Tejútrendszer egyéb régióiban megszokott értéktől több nagyságrenddel nagyobb, így mód nyílik a csillagok közötti különféle gravitációs kölcsönhatásokra: tömeg szegregáció, kilökődés, akár egyedi csillagok ütközésére is (Marks és mtsai, 2008).

A halmazok csillagsűrűsége a centrum felé drasztikusan megnő, a 47 Tuc esetében eléri a 10^5 csillag/ pc^3 értéket is (Davies & Sigurdsson, 2001). Összehasonlításképpen: a csillagsűrűség a Nap körüli térrészben mindössze 0,03 csillag/ pc^3 . A mellékelt ábrán egy



1. ábra. Az M14 felületi csillagsűrűségének három dimenziós ábrázolása. A halmaz belső 10 ívperces régiójának 2MASS adatait felhasználva 0,01 fokos lépésben, 0,03 fokos simítással készült az ábra.

gömbhalmaz tipikus sűrűségprofilja látható. Az M14 halmaz középpontjától számított 10 ívperc sugarú térrészben található 2MASS pontforrások pozícióját használtam fel a diagram elkészítéséhez. 0,01 fok oldalhosszúságú cellákra osztottam a terület és simítás céljából ettől 0,03 fok távolságon belül vettem a csillagok számát. A térbeli ábrázolás érdekében a függőleges tengelyen a cellában lévő csillagok száma szerepel. Látható, hogy meredeken nő a csillagok térbeli sűrűsége a halmaz centruma felé haladva. A tapasztalat szerint a sűrűségfüggvény jól közelíthető analitikus formában a következő függvénnyel (King, 1962):

$$f(r) = \frac{k}{1 + (r_t/r_c)^2} \left(\frac{1}{s} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

r a halmaz sugara a centrumtól kifelé mérve, r_c a „core radius”, a mag sugara, ahol a felületi fényesség a centrumban mért érték felére csökken, r_t az árapály-sugár és:

$$s = \left[\frac{1 + (r/r_c)^2}{1 + (r_t/r_c)^2} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

A halmazok elsőre szembeötlő hasonlósága ellenére viszonylag széles tartományát ölelik fel a fizikai paramétereknek, például koncentráltság (Shapley és Sawyer-féle osztályozás, I: legmagasabb centrális koncentráltság, XII: a legalacsonyabb), abszolút fényesség ($-10,4$ és -3 között, átlagosan $M_V \sim -7$), integrált színtípus (F3 és G5 között), fém-tartalom ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2,5$ -től a Napra jellemző értékig, a galaktikus dudorban (bulge) pedig akár $+0,2$ - $0,3$ -t is elérheti). Bár a $[\text{Fe}/\text{H}]$ értéke elég jól közelíti a valós fémességet, egyes

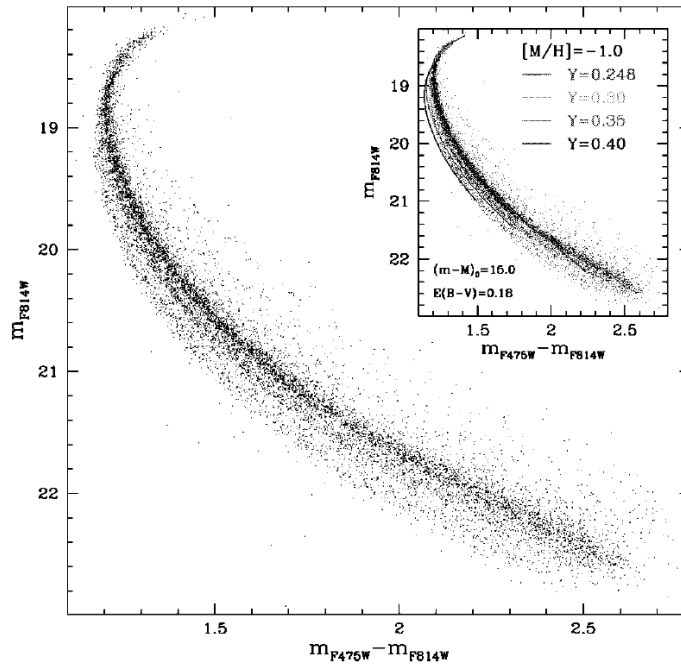
elemek hányada ($[O/H]$, $[Mg/H]$ stb.) ettől függetlenül is változhat (Ivans & Kraft, 2007).

A gömbhalmazok minden kétségen felül a galaxiskeletkezés építőelemei, ám ez a folyamat részleteiben még nem értett. Tény, hogy galaxisunk tartalmaz gömbhalmazt (például M54), amely valaha a szétdarabolódás alatt lévő Sagittarius törpegalaxisához tartozott, illetve több halmaz (pl. ω Cen) tulajdonságai is arra utalnak, hogy egy korábbi törpegalaxis maradványai lehetnek. A nagy csillagszámnak köszönhetően a gömbhalmazokban számos, különböző osztályhoz tartozó változócsillag található, legelterjedtebb közülük az RR Lyrae változók, amelyeket emiatt halmazváltozóknak is neveznek.

A gömbhalmazok fentebb említett tulajdonságaik alapján az obszervációs asztrofizika legfontosabb objektumai közé tartoznak, amelyek vizsgálata szerteágazó, újszerű eredményekhez vezethet. A gömbhalmazok viszonylag korán kifarrott asztrofizikája ellenére az utóbbi idők kutatásai számos olyan eredményt mutattak fel, amelyek jelentősen árnyalják ezt a képet. Néhány ezek közül:

- Bár az Univerzum legidősebb objektumai között tartjuk számon a gömbhalmazokat, néhányról kiderült, hogy jóval fiatalabbak, koruk mindössze néhány milliárd év. A Tejútrendszer gravitációs árapály erői által lecsupaszított Whiting 1 a mára már feldarabolt Sagittarius elliptikus törpegalaxisához (Sgr dSph) tartozott, erre utal a halmaz égi pozíciója, Naptól való távolsága és a radiális sebessége is. A szín–fényesség-diagram alapján a galaktikus halóban, 30 kpc-s távolságban lévő Whiting 1 kora $6,5^{+1,0}_{-0,5}$ milliárd év, emellett spektroszkópiai vizsgálatok alapján viszonylag fémgazdag (Carraro és mksai, 2007).
- A halmazon belüli csillagok születésére vonatkozó eddigi leegyszerűsített elméleteknek (egyszeri és azonos időben bekövetkező csillagkeletkezés) ellentmondó eredmények láttak napvilágot, lásd például az NGC 2808-ban megfigyelt többgenerációs csillagkeletkezést (Piotto és mksai, 2007). A Hubble Űrtávcsővel nyert fotometriai adatok alapján konstruált szín–fényesség-diagramon az NGC 2808 fősorozata 3 egymástól jól elkülönülő szekvenciára tagolódik, ami a halmaz különböző hélium tartalommal bekövetkező, komplex csillagkeletkezést jeleznek (lásd a 2. ábrát). A szerzők más nagytömegű halmazok esetében is összetett csillagkeletkezési történetre utaló nyomokat találtak. A legújabb eredmények között említhető Milone és mksai (2008) és Marino és mksai (2008) munkái az NGC 1851-re és az M4-re vonatkozóan.

A gömbhalmazok többszörös csillagpopulációival kapcsolatban régóta behatóan vizsgált az ω Centauri, melynek a szubóriás, vörös óriás és aszimptotikus óriás ága is időben elnyújtott csillagkeletkezést mutat (Lee és mksai, 1999; Norris és mksai, 1996; Pancino és mksai, 2003 és 2007; Villanova és mksai, 2007). A halmaz szubóriás ágában 4 különböző csillag populációt figyeltek meg: 1., idős, fém-szegény csoportot ($[Fe/H] \sim -1,7$), 2., szintén idős, de fémekben dúsabb csoport-



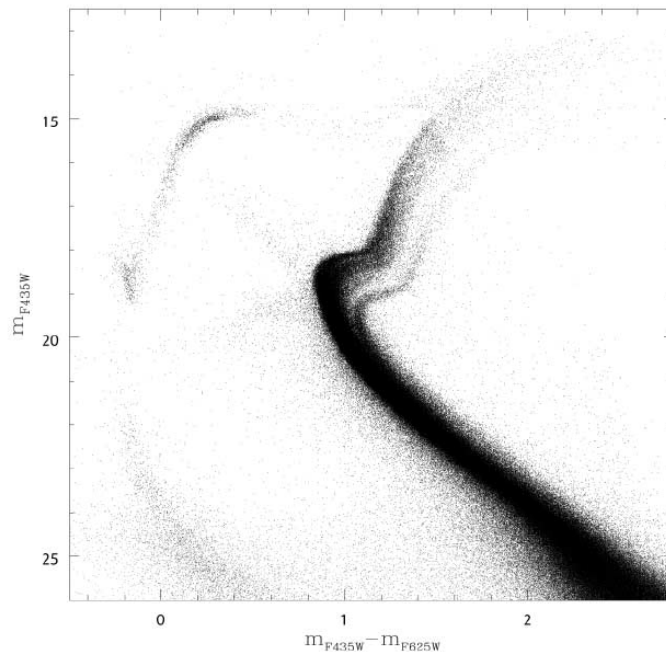
2. ábra. Az NGC 2808 hármas főszorozata a HST-vel készített szín-fényesség-diagramon (Piotto és mksai, 2007).

tot ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1,1$), 3., ezektől 4-5 milliárd évvel fiatalabb, fémszegény ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1,7$) csillagokat, 4., fiatal, közepes fémségű csillagok csoportját ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1,4$), amelyek átlagosan 1-2 milliárd évvel keletkeztek az „öreg” populáció után, de az adatok elemzése mindemellett kiterjedt kortartományra utal.

- Az egyik legizgalmasabb új eredmény a gömbhalmazok körüli árapály-nyúlványok kimutása, amelyek a halmazok jelenleg is zajló feldarabolódásának eredményei. Erre mindeddig a legegyszerűbb példa a Palomar 5 és az NGC 5466 esete (Odenkirchen és mksai, 2003; Belokurov és mksai, 2006). Az SDSS adatai alapján a Pal 5 legalább 10° hosszú „árapály-csövet” mutat az égbolton. Az eredmények a halmazok jövőjének felvázolásán túl a Tejútrendszer, valamint más extragalaxisok kialakulásának részleteibe is bepillantást engednek.

A fentebb említett figyelemreméltó új eredmények ellenére még napjainkban is vannak fényes gömbhalmazok (főként a déli égbolton), amelyek átfogó vizsgálata mindeztáig nem történt meg. A gömbhalmazok asztrofizikai jelentőségére utal az alábbi összefoglaló lista, ahol felsorolásszerűen megtalálhatóak az általuk vizsgálható területek és röviden a fontosság okai:

- galaxisok korai fejlődése (a halmazok elsőként és kémiaiilag nem szennyezett alakultak ki)
- csillagfejlődés (egyszerű csillag populációk, az időfejlődés tesztelhetősége)



3. ábra. Az ω Centauri gömbhalmaz HST ACS műszerével készített szín–fényesség-diagramján több mint egymillió csillag van feltüntetve (Villanova és mksai, 2007).

- a távolság meghatározása (az RR Lyr csillagok, mint távolságindikátorok, a halmazok integrált luminozitás függvényei)
- a kor meghatározása (az elfordulási („turn-off”) pont luminozitása, az abszolút kor, mint alsó korlát az Univerzum korára, relatív kor: a második paraméter problémája)
- dinamikai vizsgálatok (sűrű környezet: magösszezuhanás, párolgás, ütközések, tömeg szegregáció; a halmaz, mint a galaktikus gravitációs mező tesztreszecskeje)
- érdekes objektumok (erős-gyenge-diffúz röntgenforrások, kék vándorok, különleges változócsillagok, planetáris ködök)

2.2. A gömbhalmazok vizsgálati módszerei

2.2.1. Fotometria

A gömbhalmazokban viszonylag kis térfogatban - s így a látóirányú vetületben kis látómezőben - nagyszámú csillag található, így még kisebb látómezejű távcsövekkel is számos objektum fotometriáját lehet gyorsan, egyszerre elvégezni. A fotometria során célunk az égitestek fényességeinek meghatározása, ami lehet egyszerű instrumentális fényesség és standardizált fényesség is. Már az előző is számos lehetőséget kínál, például a fénygörbe - azaz idő függvényében ábrázolva a fényesség változása - egyszeri, gyors szemrevételezésével sok esetben nagy biztonsággal megállapítható például egy változócsillag típusa. Ehhez elegendő egyszerű differenciális fotometriát elvégezni, vagyis a

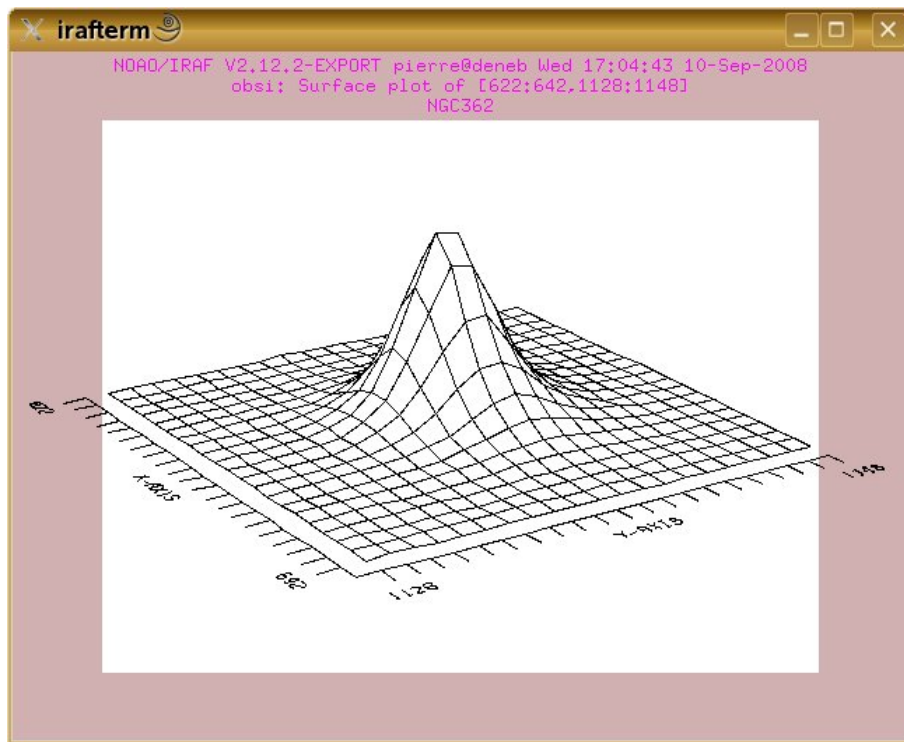
csillag szűkebb környezetében lévő, konstans fényességűnek, azaz nem változócsillagnak feltételezett csillag(ok) fényességéhez összehasonlítani az objektum fényességét, csupán kivonva egymásból az instrumentális magnitúdókat. Az értekezésben bemutatott gömbhalmaz fotometria során nem csupán egy vagy két összehasonlító csillagot használtunk, hanem több lépésben, egymást követő iterációban történt meg a megfelelő összehasonlító csillagok kiválasztása minden esetben ellenőrizve a valóban konstansnak tekinthető (azaz esetünkben önkényesen, de jó közelítéssel $\Delta m < 0,01$) fényességet.

Az értekezésben szereplő NGC 362 gömbhalmaz fotometriájánál fő célunk a halmazban található változócsillagok mindeddig legteljesebb felmérése volt, amihez idősor fotometriát alkalmaztunk: jól definiált expozíciós időkkal folyamatosan rögzítettük a halmaz CCD képeit, amelyek utólagos feldolgozásakor előállítható több ezer csillag fénygörbéje. Az alábbi változócsillag típusok fordulnak elő gömbhalmazokban:

- RR Lyrae csillagok: a legfontosabb osztály, halmazokban való gyakoriságuk okán halmazváltozónak is nevezik ezeket a tipikusan fél napos periódusú, leggyakrabban A színképosztályú, fémszegény radiális pulzátorokat, melyek jó közelítéssel állandó abszolút fényességük - $M_V \approx 0,^m5$ - következtében távolság meghatározására is alkalmasak;
- W Vir csillagok: II. populációs cefeida változók több napos periódussal;
- SX Phe csillagok: a δ Scuti csillagok idősebb, II. populációs megfelelői, radiális és nemradiális módusokban egyaránt pulzálhatnak;
- fedési kettősök: jelentős lehet a szerepük a távolság pontosításában;
- fehér törpék;
- kataklizmikus változók;
- milliszekundumos pulzárok, neutroncsillagok.

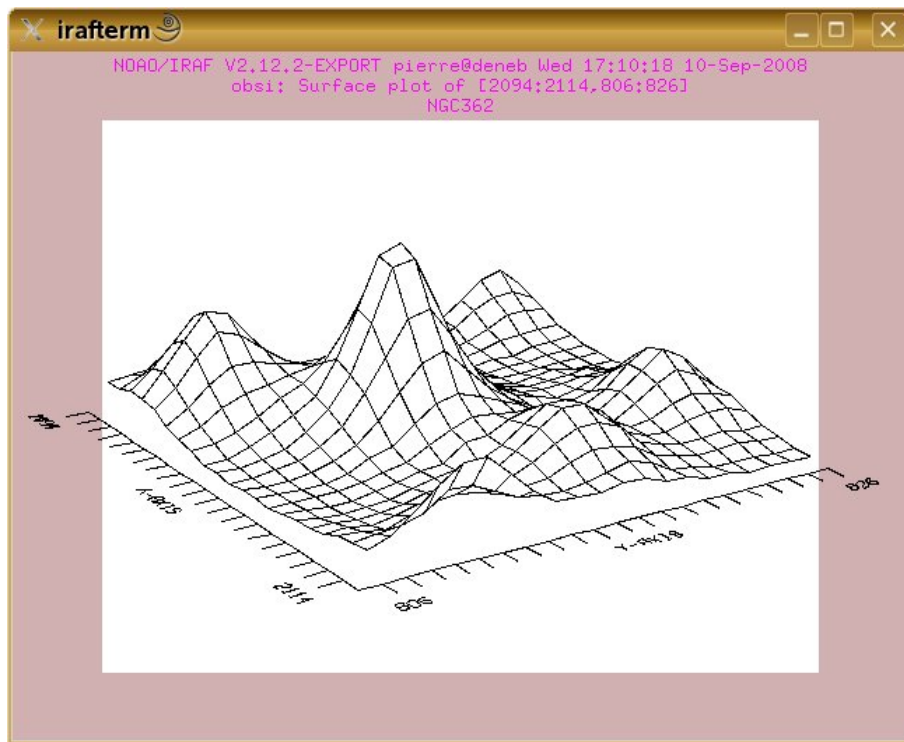
A fotometria elvégzéséhez alapvetően három út kínálkozik: apertúra, PSF és képkivonásos fotometria.

- A legegyszerűbb eljárás az apertúra fotometria, amikor az objektum körüli - leggyakrabban kör alakú - apertúrában megszámoljuk a beérkezett fotonokat, amit azután korrigálunk az égi háttér értékével. Olyan esetekben célszerű alkalmazni, ahol a mérendő objektum (pl. csillag, kisbolygó) viszonylag jól szeparált a környezetétől, vagyis az alkalmazni kívánt apertúrába nem kerül bele más forrás(ok)ból származó foton.



4. ábra. Egy különálló, magányos csillag képének intenzitás-eloszlása.

- A PSF fotometria (Point Spread Function, pont kiterjedési függvény) során egy speciális függvény (IRAF-ban például Gauss, Lorentz vagy ezek kombinációja) illesztését végezzük el a csillagok képeire, majd az illesztett függvény alatti térfogat integrálásával következtetünk a detektált fotonok számára. Gömbhalmazok tanulmányozása során nagyon gyakran ütközünk abba a problémába, hogy az egymáshoz nagyon közel álló csillagok képe részben átfedi egymást, megghiúsítva ezzel a pontos fotometriát. Különálló csillagok fotometráására elsőrendűen alkalmas a PSF fotometria, hiszen az előre kiszámított profil könnyedén illeszthető, lásd 4. ábra. A halmaz centrumában (5. ábra), ahol a csillagok nagyon közel helyezkednek el egymáshoz képest, a PSF illesztések egész sorára van szükség ahhoz, hogy a már illesztett profil levonása után megjelenő csillagok fényességét is meg lehessen határozni és a pontosság még ez esetben is sok kívánnivalót hagy maga után. A halmazt alkotó csillagok csupán egy részének történő kimérése az erősen koncentrált centrumban ahhoz vezethet, hogy az egyedi halmazokra vonatkozó változócsillag felmérések a valóságos értékektől messze elmaradó eredményeket adnak (Kaluzny és mksai 2001).
- Zsúfolt csillagmezőben történő változócsillag keresésre a képkivonási technika sokkal alkalmasabb, mint a PSF fotometria (Alard & Lupton, 1998). Még a viszonylag alaposan tanulmányozott halmazok esetében is adhat új felfedezéseket a képkivonási technika alkalmazása (lásd pl. Clementini és mksai, 2004). Az eljárás röviden



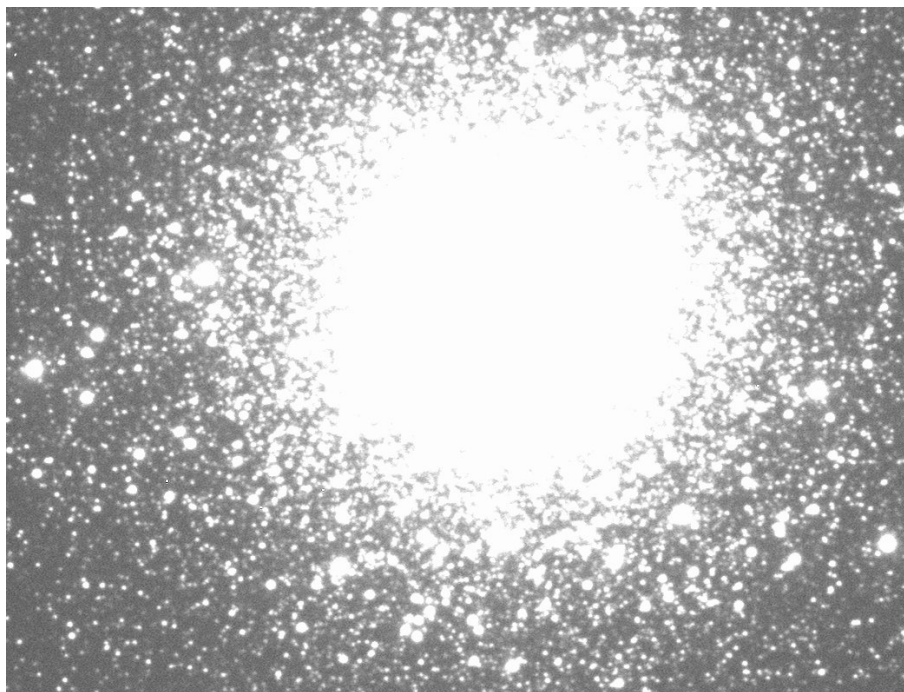
5. ábra. Halmazbeli, sűrűn elhelyezkedő csillagok esetén a PSF-ek átlapolódhatnak.

a következő: a legjobb képek (kis félértékszélességű csillagprofilok, alacsony zaj) átlagolásával nyert "master" képet kernel konvolúció segítségével minden egyes, előzőleg már asztrometriailag azonosra transzformált egyedi képből kivonjuk. Az eredményül kapott kivont képeken ideális esetben csupán a képről-képre változó erősségű források maradnak meg (6. és 7. ábrák), amelyek már PSF fotometriával könnyedén kimérhetőek. A technika megvalósításához kifejlesztett ISIS¹ program-csomag azonban számos beállítható paramétert tartalmaz, így a megfelelő eredmények eléréséhez számos egymást követő, nagy számírástechnikai kapacitást lekötő futtatásra van szükség.

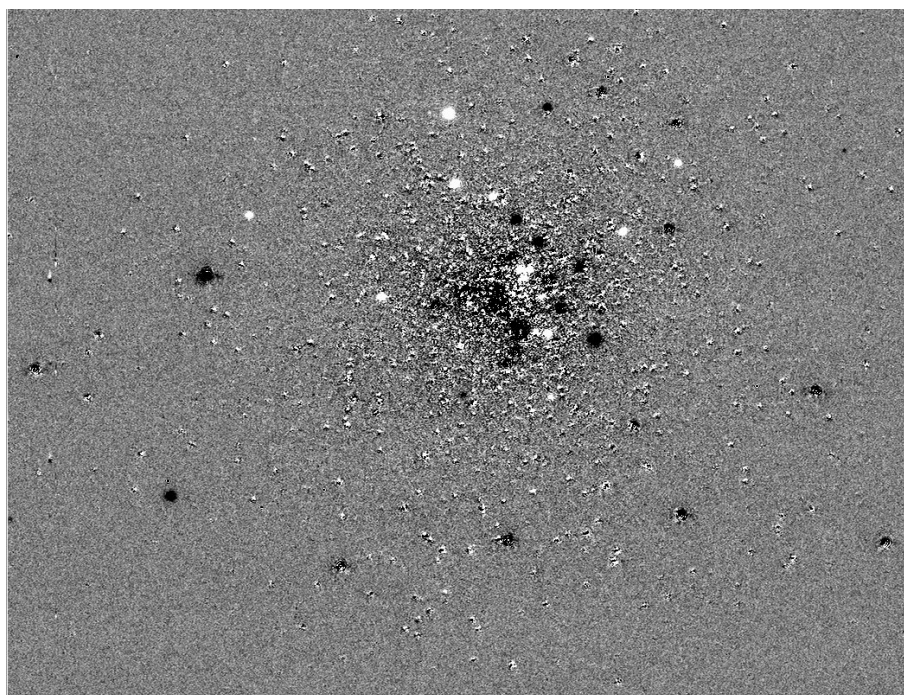
A két módszer (PSF és képkivonásos fotometria) által generált, ugyanazon változócsillagra vonatkozó fénygörbék minősége összevethető a 8-9. ábrákon, melyek jól mutatják az utóbbi előnyeit.

Mindezek mellett a képkivonási technikának egy jelentős gyakorlati nehézsége van akkor, amikor az empirikusan kalibrált fénygörbealak-fizikai paraméterek közötti kalibrációkra (például: Jurcsik & Kovács, 1996; Kovács & Jurcsik, 1996; Jurcsik, 1998; Kovács, 1998) kívánjuk használni. Amíg az ISIS szoftvercsomag megadja a fényesség időbeli változását az eltérő fluxusok formájában (a „master” képhez viszonyítva), minden empirikus összefüggés magnitúdóban megadott fénygörbék alapján kalibrált és ezen fénygörbék különböző alakúak, különösen a legnagyobb amplitúdójú fényváltozást mutató objektumok

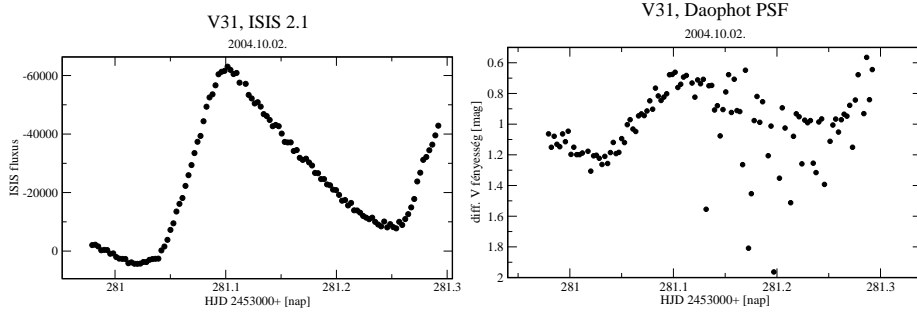
¹<http://www2.iap.fr/users/alard/package.html>



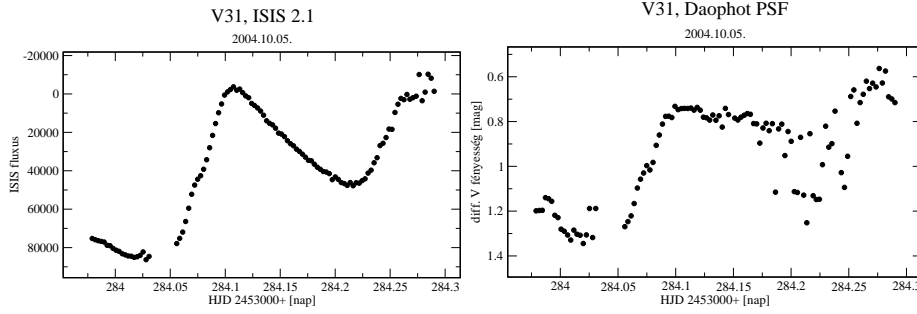
6. ábra. A NGC 362 egy CCD felvételen, amely jól illusztrálja a zsúfolt csillagmezők fotometriájának nehézségeit. A bemutatott terület csupán egy kivágott része az egy szegmensben megörökített égboltnak, valamint vizsgálataink során 3 CCD szegmenst használtunk.



7. ábra. Egy, az ISIS 2.0 program felhasználásával készített pillanatkép. Az állandó fényű csillagok levonása után maradó képen a változó fluxusú csillagok jól láthatóak, mint fényes és sötét foltok, attól függően, hogy a referenciaképhez viszonyítva fényesedtek vagy halványodtak.



8. ábra. A V31 ISIS és PSF fénygörbéi 2004. október 2-án.



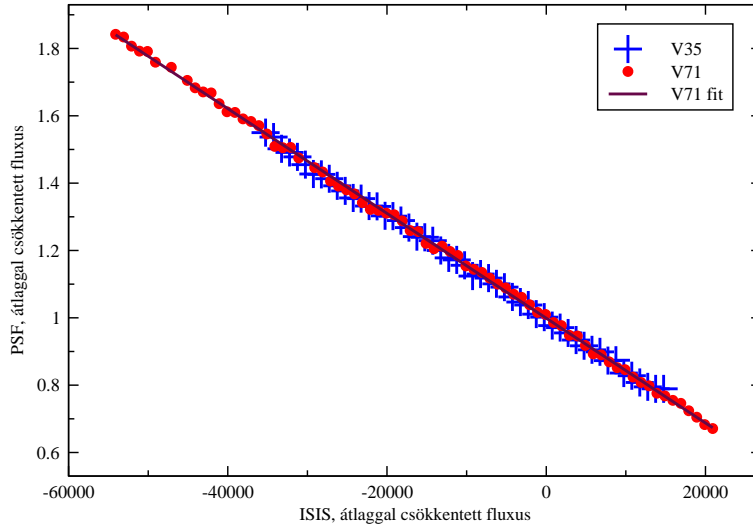
9. ábra. A V31 ISIS és PSF fénygörbéi 2004. október 5-én.

esetében. Az ISIS használatával kapott fénygörbék tehát első közelítésben nem használhatóak fénygörbealak-fizikai paraméterek közötti kalibrációkra. A fluxusbeli értékek magnitúdóvá történő konvertálásához ezért szükséges a mester képen elvégezni egy megbízható magnitúdó becslést minden változócsillagra, különben a konverzió és vele együtt a kalibráció nem lehetséges (lásd pl. Corwin és mksai, 2006).

Mivel közel kétszer annyi RR Lyrae csillagot detektáltunk az ISIS szoftvercsomaggal mint a daophot PSF taszkjaival, kifejlesztettünk egy egyszerű eljárást (témavezetőm, Kiss László közreműködésével), amivel lehetségessé válik a fluxus- és a magnitúdóskálák közötti konverzió. Alapvető feltételezésünk az volt, hogy létezik egy egyedi átváltás, egy skálázás az átlaggal csökkentett ISIS fluxusok és a szintén átlaggal csökkentett daophot magnitúdókból kiszámolt fluxusok között, így felírhatjuk a következő egyenletet:

$$10^{-0,4(m-\langle m \rangle)} = 1 + c(f - \langle f \rangle). \quad (3)$$

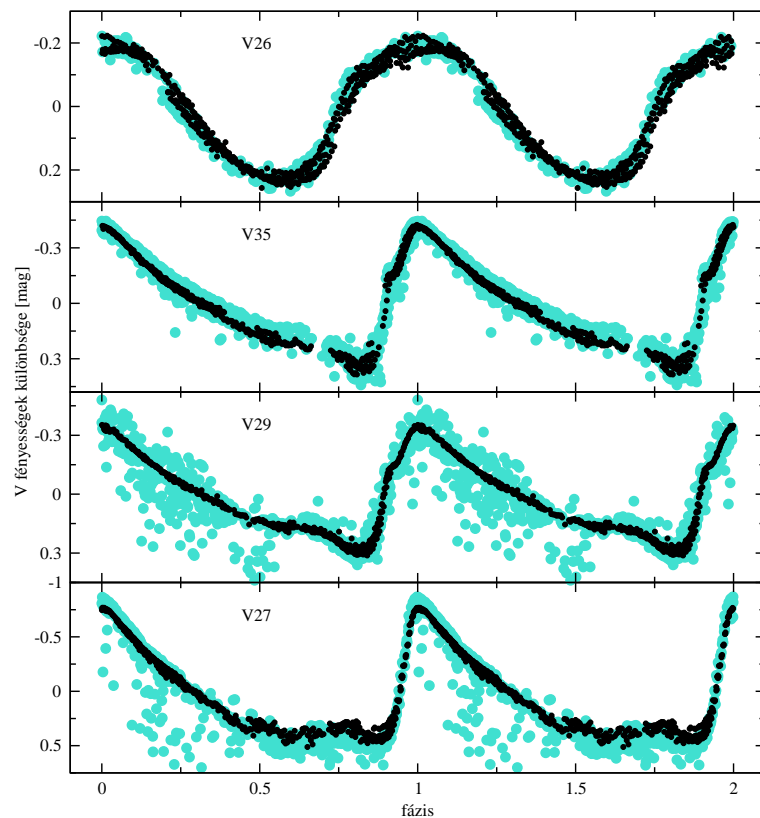
Ebben az esetben f a differenciális fluxus, m a differenciális magnitúdó az összehasonlító csillagok átlagához viszonyítva, míg $\langle \rangle$ az átlagértékekre vonatkozik, amelyeket a populációs átlag $\langle f \rangle = \int_0^1 f(\varphi) d\varphi$ és $\langle m \rangle = -2,5 \log(\int_0^1 10^{-0,4m(\varphi)} d\varphi)$ ad meg a fázisba rendezett fluxusok és magnitúdók számára. Jegyezzük meg, hogy az egyenlet felírásánál feltételeztük, hogy a két populációs átlag a csillag ugyanazon állapotára vonatkozik, ez az oka annak, hogy az $\langle m \rangle$ átlagértéket a megadott kifejezéssel definiáltuk. Elviekben a c



10. ábra. Az átlaggal csökkentett fluxusok közötti konverzió.

konverziós faktor meghatározható az ISIS fluxus görbékből és a daophot magnitúdó görbékből olyan csillagokra vonatkozóan, amelyek a halmaz külső régióiban találhatóak, így ott a zsúfolt látómező nem okoz különösebb problémát. Ezek után az egyenlet alkalmazható azokra a változócsillagokra is, amelyekről csak fluxusgörbék állnak rendelkezésre, így kiszámítható az egyenlet bal oldala, aminek $-2,5$ -tel szorzott logaritmusa megadja a magnitúdó görbét nulla átlagra vonatkozóan.

A 10. ábrán feltüntettük két nagy amplitúdójú RR Lyrae csillag adatait, amelyek a látómező külső részén találhatóak. A V71 a legnagyobb amplitúdójú változócsillag, mindemellett a látóirányban nincs hozzá közel eső csillag, vagyis a látómező zsúfoltsága (angol kifejezéssel *crowding*) nem okoz gondot, így ennek a csillagnak az adatait használtuk fel a c meghatározásához. A 10. ábrán látható kör alakú piros pontok által kirajzolt fekete folytonos vonallal jelölt egyenes meredeksége $c = (-1,550 \pm 0,005) \times 10^{-5}$. Mivel ezek a kalibrációs pontok lefedik az összes RR Lyrae csillag ISIS fluxustartományát, nincs szükség extrapolációra a többi csillag esetében. Összehasonlításképpen az ábrán feltüntettünk egy másik jól szeparált csillagot, a V35-öt. A két csillag adata sehol sem tér el 1%-nál jobban, így egyedül a V71 által bekalibrált első egyenlet 0,01 magnitúdón belül (a nullpont nélkül) megadja a fluxusból származó magnitúdóban kifejezett fényességet. Néhány másik csillag esetében szintén összevetettük az ISIS fluxusból számolt magnitúdógörbéket a daophot magnitúdógörbével és mindig kiváló egyezést kaptunk (lásd 11. ábra), ami megerősíti gondolatmenetünk helyességét és a kidolgozott módszer alkalmazhatóságát. Ezek után minden olyan csillagra kiszámoltuk az ISIS fluxusból származó magnitúdógörbéket, amelyekre a fázisbeli lefedettség elegendően jó volt.



11. ábra. Átlaggal csökkentett fénygörbék összehasonlítása: világosszürke/türkiz pontok jelzik a daophot futtatásával kapott eredményt, míg a fekete szín az 1. egyenlet ISIS fluxusokra történő alkalmazásával kapott pontokat jelöli. A V27 és V29 esetében látható nagy szórás oka a zsúfolt látómező.

2.2.2. Spektroszkópia

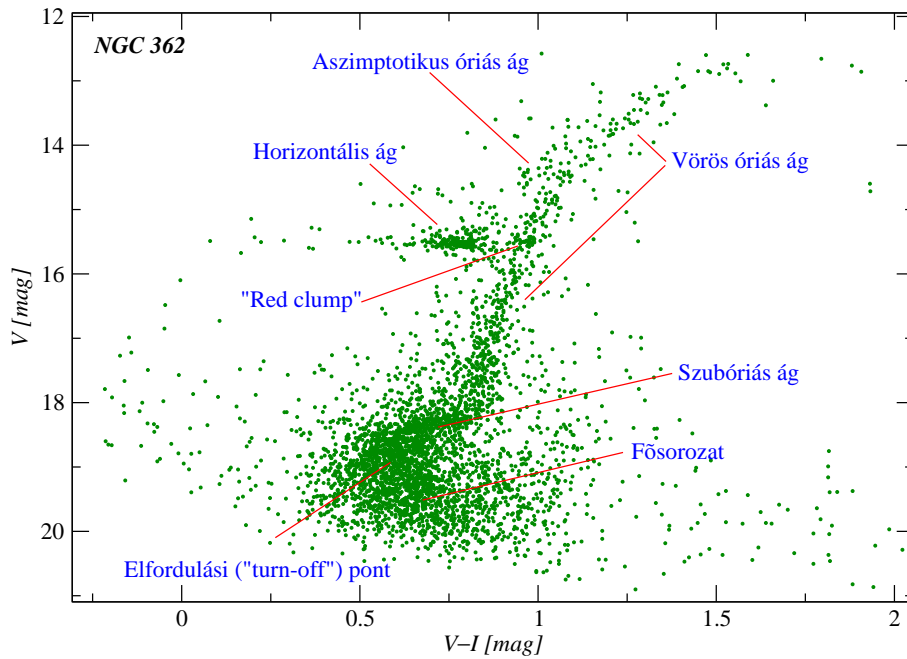
A színekpvonalak elemzése során a fotometriánál lényegesen sokrétűbb információk nyerhetők. Dinamikai vizsgálatok elvégzéséhez meghatározhatóak az egyedi objektumok látóirányú sebességei (lásd a következő fejezet az AAOmega méréseivel), lehetséges a spektráltípusok meghatározása, nagyfelbontású spektroszkópiával pedig a csillagok kémiai összetétele is megállapítható. Fotometriából származó adatok kombinálásával pedig egyéb fizikai paraméterek, például a pulzáló csillag sugara is meghatározható (Baade–Wesselink-analízis, pl. Fouqué és mksai, 2007)

2.3. Fizikai paraméterek meghatározása

Gömbhalmazok fizikai tulajdonságainak meghatározásához az egyik legsokoldalúbb eszköz a halmaz Hertzsprung–Russell-diagramja (HRD). Ez utóbbi elkészítéséhez meg kell határoznunk a halmaz csillagainak luminozitását, valamint effektív hőmérsékletét, és ezekhez spektroszkópiai eszközöket is be kell vetnünk. A gömbhalmazok spektroszkópiája egyrészt az alkotó csillagok nagy látóirányú sűrűsége, másrészt azok halványsága miatt nehézkes, ezért elterjedtebb a HRD-vel egyenértékű szín–fényesség-diagram (Colour-Magnitude Diagram, CMD) elkészítése, hiszen az ehhez felhasznált, valamilyen szűrőn keresztül mért fényesség a luminozitással, a színindex (két eltérő szűrőn keresztül mért fényességek különbsége) pedig az effektív hőmérséklettel arányos. A két eltérő úton kapott ábrán - azaz a HRD-n és a CMD-n - hasonló módon rajzolódnak ki a halmazon belüli csillagfejlődés jellegzetes szakaszai. Az általunk vizsgált NGC 362 gömbhalmaz szín–fényesség-diagramja a 12. ábrán látható, amelyen bejelöltem ezeket a jól elkülöníthető részeket.

A kor az egyik legérdekesebb kérdés, ha a gömbhalmazok tulajdonságairól beszélünk. Ennek meghatározására több módszer is használatos. Az egyik eljárás a fősorozat úgynevezett „elfordulási pontjában” (main sequence turn-off point) található csillagok tömegének becslése (Bergbusch & Vandenberg, 1992). Ugyanis az itt található csillagok a halmaz korának előrehaladtával egyre kisebb tömegűek, mivel a nehezebb csillagok közben elfejlődtek a halmaz vörös óriás ágára. A fősorozat elfordulási pontjának elméleti izokronokkal való összevetése is lehetőséget ad a kor és a fémesség meghatározására.

Az izokronillesztés első szava a görög *iso* „azonos” és a *chronos* „idő” szavak összevonásával keletkezett és így azonos idejűt jelent. Elméleti számítások segítségével meghatározhatóak különböző fizikai paraméterű csillagok fejlődési útvonalai a HRD-n. A 13. ábrán látható eltérő színű görbék ilyen különböző tulajdonságú (tömegű), de azonos korú csillagok helyzetét mutatják a $(V - I) - M_V$ diagramon. Az ábra elkészítéséhez a Yonsei-Yale (Y^2) izokronokat (Demarque és mksai, 2004) használtam fel. Felülről lefelé a következő korú izokronokat tüntettem fel: 0,1, 0,4, 0,8, 1,2, 1,8, 2,5, 4, 6, 8, 10, 12 és 14 milliárd év. Az elemösszetételt és fémességet jelző paraméterek: $X=0,75$, $Y=0,244$,

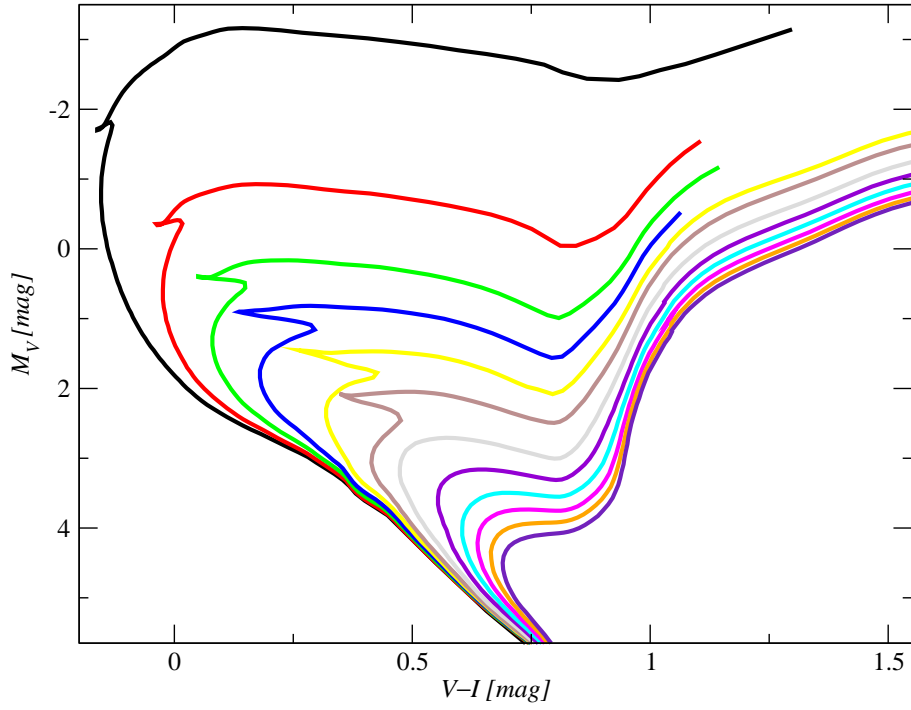


12. ábra. Az NGC 362 gömbhalmaz szín–fényesség-diagramja. Az ábrán nyíllal és felírással jelöltem a tipikus fejlődési szakaszokat.

$Z=0,007$, $[\text{Fe}/\text{H}]=-0,43$, $[\alpha/\text{Fe}]=0$. Egy adott gömbhalmaz szín–fényesség-diagramját felhasználva, arra különböző izokronákat illesztve meghatározható számos paraméter, például fémesség, kor, vörösödés, távolság.

A távolság meghatározására szintén több módszer kínálkozik. A halmaz szín–fényesség-diagramján meghatározható a horizontális ág fényessége. A halmaz populációjának ezt a részét főként kisebb tömegű csillagok alkotják, mivel korábban a vörös óriás fázisban jelentős mennyiségű anyagot vesztek. Az itt található objektumok azonos abszolút fényességűek, amelyet a látszólagos fényességgel összehasonlítva meghatározható a halmaz távolsága. A horizontális ágat főként RR Lyr csillagok népesítik be, segítségükkel hozzávetőleg 200 kpc-ig mérhető a távolság. Az utóbbi idők fontos távolság meghatározási módszere a fedési kettősökön alapul. Az ehhez felhasznált összefüggés az abszolút fényesség, vörösödésmentes színindex, az orbitális periódus és a fémesség ismeretén alapul (például Rucinski, 1993). Ezen objektumok kiválóan alkalmasak gömbhalmazok távolságának pontosítására is (lásd pl. Kaluzny és mktsai, 2005).

Egyedi RR Lyr csillagok fizikai tulajdonságainak ismerete lehetővé teszi egyben a halmaz paramétereinek meghatározását is, mivel az egyedi objektumok paraméterei jó közelítéssel azonosak az őket tartalmazó nagyobb rendszer megfelelő paramétereivel. Például a fémesség és luminozitás megkapható a fénygörbék Fourier felbontásából (Kovács & Jurcsik, 1996, és Jurcsik & Kovács, 1996), mint azt majd a 3.4 fejezetben részletesen tárgyalom.



13. ábra. A fenti ábrán különböző korú elméleti izokrónok egy tartományát mutatom be 0,1 és 14 milliárd év között (felülről lefelé). A görbék további paraméterei: $X=0,75$, $Y=0,244$, $Z=0,007$, $[\text{Fe}/\text{H}]=-0,43$, $[\alpha/\text{Fe}]=0$.

2.4. A gömbhalmazok kinematikája

Az alábbiakban a gömbhalmazoknak - köszönhetően a közelmúltban épített hatékony műszereknek és a nagyobb teljesítményű számítógépek fejlesztésének - egyre jobban szimulálhatóbb és ellenőrizhetőbb kutatási területét szeretném részletesebben bemutatni.

Közeleli gömbhalmazok esetében mód nyílik az egyedi csillagok felbontására, így elegetően fényes objektumokra az egyedi látóirányú sebességük is megmérhető a színképvonalak Doppler-eltolódása alapján. Mivel az egyedi csillagok sebességei közti eltérés csupán néhány km s^{-1} , viszonylag nagy felbontású és jó minőségű spektrumokra van szükség a laboratóriumi hullámhosszakhoz viszonyított $\Delta\lambda < 0,01 \text{ nm}$ színképvonal-eltolódások kimérésére. A múlt század végén nehéz munkával egyesével vették fel gömbhalmazbeli fényes csillagok spektrumait, százas nagyságrendben, ami azonban kevésnek mutatkozott a halmazok kinematikájának alapos elemzéséhez (pl. Gunn & Griffin, 1979; és Meylan & Mayor, 1986, Meylan, 1987 a 47 Tuc és az ω Cen vizsgálatai). Az elmúlt évtized egyik nagy megfigyeléstechnikai fejlesztése volt a multiobjektum-spektrográfok megjelenése (Côté és mksai, 1995). Ezekkel sokkal homogénebb mintát lehetett begyűjteni nagyságrendileg kevesebb értékes távcsőidő ráfordításával. Ezek az adatok már lehetővé tették a gömbhalmazok kinematikájára vonatkozó elméletek gyakorlati ellenőrzését (Drukier és mksai, 1996). Az egyik egyszerű kérdés annak eldöntése, hogy halmazok lapultságát okozhatja-e forgás. Mivel az ellipticitás ($\epsilon = \sqrt{\frac{a^2-b^2}{a^2}}$, a és b a tengelyek) alacsony ($\epsilon < 0,1$), a véletlenszerű mozgáshoz (σ) képest a forgás (v) aránya is elegetően

alacsony lehet, $v/\sigma < 0,3$. A megfigyelések által mutatott kinematikai tulajdonságok és az ellipticitás szerint valóban forgás okozza a kismértékű lapultságot (Einsel & Spurzem 1997). A kis forgási sebesség és az alak miatt jó közelítéssel tekinthetjük a gömbhalmazokat szférikus rendszereknek. Ha az egyedi sebességekből levonjuk a halmaz átlagát és az így kapott értékeket a csillag központtól való távolságának függvényében ábrázoljuk, jellegzetes ék alakú eloszlást kapunk (Petersen és mksai, 1989), ami saját méréseinket tekintve a 37. ábrán is megfigyelhető. A sebességszórás növekvő sugárral való ilyen csökkenése általános tulajdonsága egy véges kiterjedésű csillaghalmaznak, amelyet izotropikus pályán mozgó csillagok alkotnak, például a King-modellben (King, 1962). A modell viszonylag egyszerű feltevések mellett adja meg a felületi sűrűséget (pl. csillagok száma négyzetívpercenként) r , r_c és r_t felhasználásával.

Itt r a halmaz sugara a centrumtól kifelé mérve, r_c a „core radius”, a mag sugara, ahol a felületi fényesség a centrumban mért érték felére csökken, r_t pedig az árapály-sugár. A gömbhalmazok dinamikájában az egyik legfontosabb paraméter az árapály-sugár. Ezt a halmaz magjától mérjük és definíció szerint azt a távolságot jelenti, ahol a halmaz egy csillagára ugyanakkora gravitációs vonzerőt gyakorol a halmaz és a galaxis. A Tejútrendszer nagy méretű és hozzánk közel eső halmaza, a 47 Tuc esetében ez az érték 45,9 ívperc, ami a halmaz 4,5 kpc-es távolságában közel 100 fényévnek felel meg (Leon és mksai, 2000). A halmazok morfológiai leírásánál használatos még a koncentráció paramétere: $c = \log r_t/r_c$. r_c értékét a rendszer belső energiája határozza meg, míg r_t -t külső árapály-erők adják meg, amelyek a megfigyelések szerint jó egyezésben vannak a Tejútrendszertől származó erővel.

2.4.1. Árapály-hatások a halmazok külső régióiban

A gömbhalmazok dinamikai fejlődését különböző belső és külső folyamatok befolyásolják. A hosszú távú formálódás egyik fő irányítója maguknak az alkotó csillagoknak az asztrofizikai fejlődése, emellett a ketttest-relaxáció, illetve az árapály-lökések játszanak jelentős szerepet. A csillagfejlődés főként a halmaz fejlődésnek korai fázisában fontos és laza halmazok esetében önmagában elegendő (pl. jelentős tömegvesztés a csillagok élete végén) lehet a halmaz felbomlásához néhány milliárd év alatt. A ketttest-relaxáció maxwelli eloszlást eredményez a csillagok sebességének tekintetében:

$$f(v) = Ke^{-BE} \quad (4)$$

ahol K konstans, $B \equiv \frac{3}{\langle v^2 \rangle}$, $E = \frac{1}{2}v^2 + \phi(r)$ a csillag mechanikai energiája. A nagy sebességgel rendelkező csillagok elegendő energiára tehetnek szert ahhoz, hogy elszökjenek a halmaztól (King, 1965 illetve 1966; Spitzer & Thuan, 1972). A külső árapályhatások szintén felgyorsítják a halmaz szétesését. Árapály-lökéseket a halmaz a galaxis korongján való áthaladáskor, illetve a központi dudor (bulge) megközelítésekor szenved el (Ostriker

és mktsai, 1972; Spitzer, 1987). Az elszökött csillagok mindazonáltal a szülőhalmaz közelében maradnak és egy bizonyos ideig fennmaradó árapály-nyúlványt formálnak. Ezek létre, kialakulásának módjaira számos elméleti munka és szimuláció utal (néhány legutóbbi munka: Fellhauer és mktsai, 2008; Montuori és mktsai, 2008) Napjainkra azonban már megfigyelési tények támasztják alá a gömbhalmazok körüli árapály-nyúlványok létét a Palomar 5 és az NGC 5466 esetében (lásd például Grillmair és Johnson, 2006; Odenkirchen és mktsai, 2001, Belokurov, 2006). Ezeknek az árapály-nyúlványoknak a tulajdonságai minden bizonnyal kapcsolatban állnak a halmaz keringési pályájával, a halmaz helyzetével és a galaktikus potenciállal, azonban ezek az összefüggéseknek a fontosabb részletei nem ismertek kellően (Montuori és mktsai, 2007; Lee és mktsai, 2006, Grillmair, 1998).

Az árapály-erők gömbhalmazokra gyakorolt hatásainak elméleti kutatásában jól bevált módszer az N-test szimuláció, ahol nagyteljesítményű számítógépekkel jelentős számú csillagra vonatkozóan végzik el a kölcsönös gravitációs hatások kiszámítását (Lee és mktsai, 2006). Ezek a számítások valóban megmutatták az árapály-nyúlványok meglétét (nagy tömegvesztés mellett a halmaz pályája mentén vezető, illetve követő irányban), valamint az eredményül kapott felületisűrűség-eloszlás által mutatott „csomósodás” a nyúlványokban lévő csillagok lassuló mozgására utal.

A gömbhalmazok dinamikai fejlődésének tanulmányozására a legmegfelelőbb módszer a közvetlen N-test integrálás, azonban a módszer kivitelezhetetlenné válik nagy N esetén, ahol N a vizsgált csillagok száma. Az ilyen irányú vizsgálatok megfelelő, elfogadható eredményéhez N-nek 10^6 -os nagyságrendbe kellene esnie, de mivel a számításokhoz szükséges idő N harmadik hatványával skálázódik (Lee és mktsai, 2006), a jelenleg rendelkezésre álló legnagyobb kapacitású számítógépek is elégtelenek ehhez. A közvetlen N-test integrálás széles körben használt, kevesebb számítástechnikai kapacitást igénylő alternatívája a Fokker-Planck-módszer, amely természetesen kompromisszumokkal jár: a halmaz alakja gömb lehet (illetve kissé lapult forgó halmazok esetében) és a külső gravitációs mezőt is csak hozzávetőlegesen lehet számításba venni (Binney & Tremaine, 1987; Lee és mktsai, 1999; Lee és mktsai, 2006).

Lee és mktsai (2006) munkája alapján az alábbiakban bemutatok egy lehetséges modellgalaxist, amely csillagokat, gázt és sötét anyagot tartalmaz, a komponensek közül pedig csupán a haló és a központi dudor szerepel a számításokban, a korong és a küllő nem. A haló komponens potenciálját - ami logaritmikus alakú és eredménye nagy sugaraknál az ellaposodott forgási görbe - a következő kifejezés írja le:

$$\Phi(r)_{\text{halo}} = \frac{1}{2}v_0^2 \ln(R_c^2 + r^2) + \text{konstans} \quad (5)$$

ahol R_c a haló magsugara (halo core radius) és v_0 egy konstans forgási sebesség nagy r sugárnál. A központi dudor potenciálját az úgynevezett Plummer-modell (Binney &

Tremaine, 1987) adja meg, ami a galaktikus központtól kifelé haladva meredek rotációs sebesség növekedést eredményez.

A kezdeti tömegspektrum egyszerű hatványfüggvény:

$$dN(m) \propto m^{-\alpha} dm \quad (6)$$

ahol $dN(m)$ az m és $m + dm$ közötti tömeggel rendelkező csillagok száma, a Salpeter-féle kezdeti tömegfüggvényt $\alpha = 2,35$ reprezentálja. A példában a csillagok tömegei 1 és $10 M_{\odot}$ között változnak, míg a halmaz teljes tömege az azt alkotó $N = 18809$ darab csillagból $M = 4,2 \times 10^4 M_{\odot}$. A közel 20000 csillag azonban alulmarad egy reális gömbhalmazban található csillagszámhoz képest. Lee és mksai (2006) 12 szimulációt végeztek különböző halmazpályákkal, ahol az E excentricitást az R_a apogalaktikus és az R_p perigalaktikus távolságok felhasználásával a következő kifejezés adja meg:

$$E = \frac{R_a - R_p}{R_a + R_p} \quad (7)$$

A halmaz árapály-sugarát a következő kifejezés írja le:

$$r_t \equiv \left(\frac{M_c}{2M_G} \right)^{1/3} R \quad (8)$$

ahol R a halmaz távolsága a galaxis központjától, M_c a halmaz tömege, M_G pedig az R sugáron belüli galaktikus tömeg. Természetesen r_t időben változik, hiszen az elnyújtott pályán haladó gömbhalmaz esetén R is jelentősen változik.

A különböző dinamikai folyamatok más és más időskálán zajlanak. A halmaz galaxiscentrum körüli keringése csak az orbitális paraméterektől függ, úgymint az excentricitás, peri- és apogalaktikus távolságok, de nem függ N -től. Az árapály-határon lévő csillag halmazbeli keringésének ideje hasonló magának a halmaznak az orbitális periódusához. A dinamikai fejlődés (a mag összeomlás és a tömeg szegregáció) viszont a kéttest-relaxáció időskáláján zajlik. A mag összeomlás vagy core collapse jelensége számos gömbhalmazban megfigyelhető (Djorgovski & King, 1986), amely elég idős ahhoz, hogy kéttest-relaxáció során az energia eloszolhasson a tagok között. A folyamat során a belső régiók energiát vesztenek, míg a külső tartományok többlet energiára tesznek szert. A kéttest-relaxáció egyik következménye a tömeg szegregáció: a nehezebb csillagok kinetikus energiája csökken, így a halmaz centruma felé „süllyednek”, míg a kisebb tömegű csillagok a többlet kinetikus energiájuk következtében elhagyhatják a halmaz gravitációs kötelékét: a jelenséget evaporációnak, „párolgásnak” nevezik. Nagy időskálán az evaporáció a halmaz felbomlásához is vezethet (Gnedin & Ostriker, 1997).

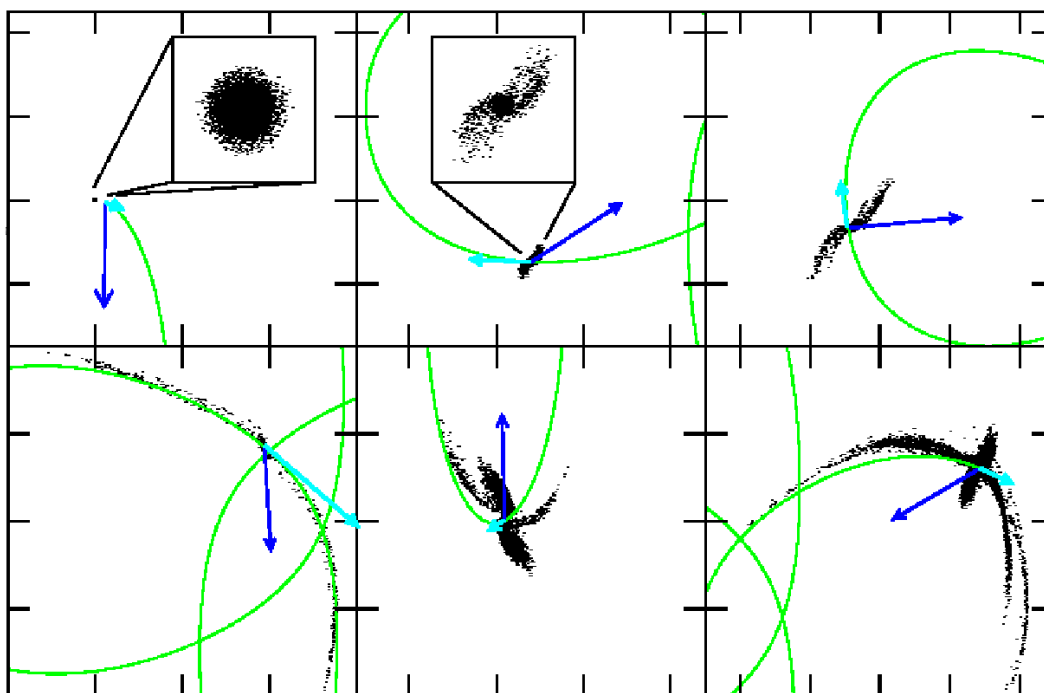
Mivel a relaxációs idő (ami alatt a sebességek gaussi eloszlást öltenek) helyi változótól - például csillag sűrűség, sebességszórás - függ, szükségessé vált egy "fél-tömegnyi" relaxációs idő definiálása (Spitzer & Hart, 1971):

$$t_{rh} \equiv 0,138 \frac{N^{1/2} r_h^{3/2}}{m^{1/2} G^{1/2} \ln(0.4N)} \quad (9)$$

ahol r_h az a sugár, amelyen belül található a halmaz teljes tömegének a fele, m pedig az egyedi csillag tömege (mivel ez nem egy jól definiált paraméter, helyettesíthető az átlagos tömeggel, lásd Lee & Goodman, 1995). Mivel $t_{rh} \propto N^{1/2}$, a modellbeli dinamikai evolúció gyorsabban zajlik, mint valós esetben és a kezdeti t_{rh} is sokkal rövidebb (esetünkben 230-370 millió év). Az evaporációs időskála szintén arányos t_{rh} -val, ezért az árapály-nyúlványok kifejlődése viszonylag gyorsan zajlik a modellben. Lee és mksai (2006) mindössze 10^9 év időtartamban végezték a szimulációt. Végezetül az az idő, amennyit a csillagok az árapály-nyúlványban töltenek, körülbelül megfelel a halmaz keringési periódusának. Az említett szerzők által végzett szimulációk eredményei és tanulságai a következőkben foglalhatóak össze:

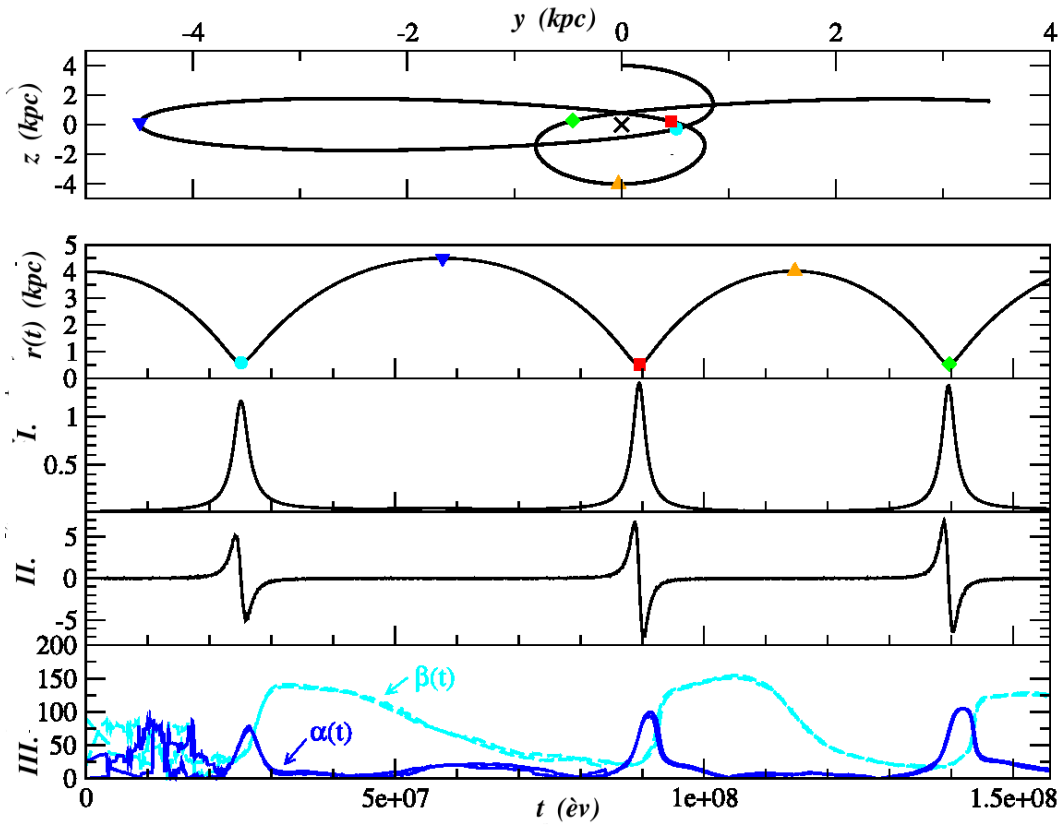
- Minden egyes szimuláció az árapály nyúlványok gyors kifejlődését eredményezte néhány keringésen belül.
- Az árapály-nyúlványok irányait a halmaz galaxison belüli elhelyezkedése és pályája határozza meg. A nyúlványok hossza az apocentrum felé nő, majd a pericentrum felé csökken. A számítások igazolták, hogy a külső - azaz a Tejútrendszerből származó - potenciáloknak jelentős a szerepe a halmaz teljes felbomlásában.
- A galaxissal való kölcsönhatások során a halmazok impulzusmomentumra tettek szert és az impulzusmomentum idővel nőtt. Az elnyújtott pályán mozgó halmazok a perigalaktikus átmenet során nagyon gyorsan növelték a perdületüket.
- Az árapály-nyomatékkal felgyorsított forgó halmazok forgási szögsebessége csökkent a központ felé, mindemellett merev test forgására kezd hasonlítani.
- A realiztikusabb megközelítéshez szükség van a galaktikus korong által okozott árapály-lökés szimulációba való beépítésére, mivel ezek is jelentős szerepet játszanak a gömbhalmazok fejlődésében és nyilvánvalóan célszerű N értékét $\sim 10^5$ nagyságrendűre növelni.

Egy hasonló N-test szimuláció eredménye az 14. és az 15. ábrákon látható (Montuori és mksai, 2007). Amint a 14. ábrán látható, árapály-nyúlványok gyakorlatilag kevesebb mint egy keringés alatt kialakulnak. Az irányuk és kiterjedtségük függ a halmaz pályamenti sebességétől és gyorsulásától. A külső részek (7-8 árapály-sugáron túl) a halmaz pályájához simulnak, míg a belső részek alakja idővel változik. Amikor a halmaz a perigalaktikus ponthoz közelít, a nyúlványok több ágra szakadnak fel. Az 15. ábra a keringési paraméterek mennyiségi változását mutatja az idő, illetve a távolság függvényében.



14. ábra. Egy halmaz árapály-nyúlványainak kialakulása Montuori és mksai (2007) számításai alapján. A világoskék nyíl a gömbhalmaz sebességvektorát jelöli, a sötétkék nyíl a galaxis centrumának irányát mutatja, míg zöld szín mutatja a halmaz pályáját. Egy négyzet oldalhosszúsága 1 kpc.

A 4. fejezetben ismertetett vizsgálataim során ezen elméleteket akartam tesztelni új árapály-nyúlványok felfedezésével, illetve mérni az esetleg talált nyúlványok mentén a sebességgradienst.



15. ábra. A keringési paraméterek változása Montuori és mktsai (2007) számításai alapján. A legfelső panel mutatja a gömbhalmaz pályáját, az alatta lévő pedig a halmaz galaktocentrikus távolságát. Az I. jelű panel a halmaz szögsebességét ábrázolja ($\omega(t) \times 10^{-1}$), a II. jelű pedig a szöggyorsulást ($\dot{\omega}(t) \times 10^{-2}$) mutatja a megfelelő átskálázásokkal. A III. panel - $\alpha(t)$ illetve $\beta(t)$ - a belső árapály-nyúlványoknak a halmaz sebességvektorával, illetve az r rádiuszvektorral bezárt szögét ábrázolja.

3. Az NGC 362 változócsillagai és halmazparaméterei

3.1. Bevezetés

Annak ellenére, hogy a gömbhalmazok a modern asztrofizika kiváló tesztobjektumai az egyidőben, hasonló kémiai összetétel mellett született rendkívül nagyszámú csillag populációjának köszönhetően, még mindig akad köztük olyan, amely alapos vizsgálata mind-ezidáig nem történt meg. Az NGC 362 eddig kevés átfogó vizsgálat tárgya volt, különös tekintettel a halmaz centrális vidékeire. Talán mindez betudható a látóirányban közel fekvő, Tejútrendszerünk kísérőgalaxisának, a Kis Magellán-felhőnek (Small Magellanic Cloud, SMC) és a hatalmas 47 Tuc gömbhalmaznak. Noha az első változócsillagokat már Sawyer 1931-es munkája is bemutatta, a legelső, teljességre törekvő változó-felmérést jelen értekezés tartalmazza. A legutóbbi vizsgálatok is csupán nagy határfényességű szín-fényesség-diagramok elkészítését célozták meg (lásd Alcaino 1976; Harris 1982; Bolte 1986 és 1987). A gömbhalmazbeli változócsillagok katalógusa² is csupán 16 bejegyzést tartalmaz, amelyek nagy része távol van a halmaztól és bizonytalan paraméterűek.

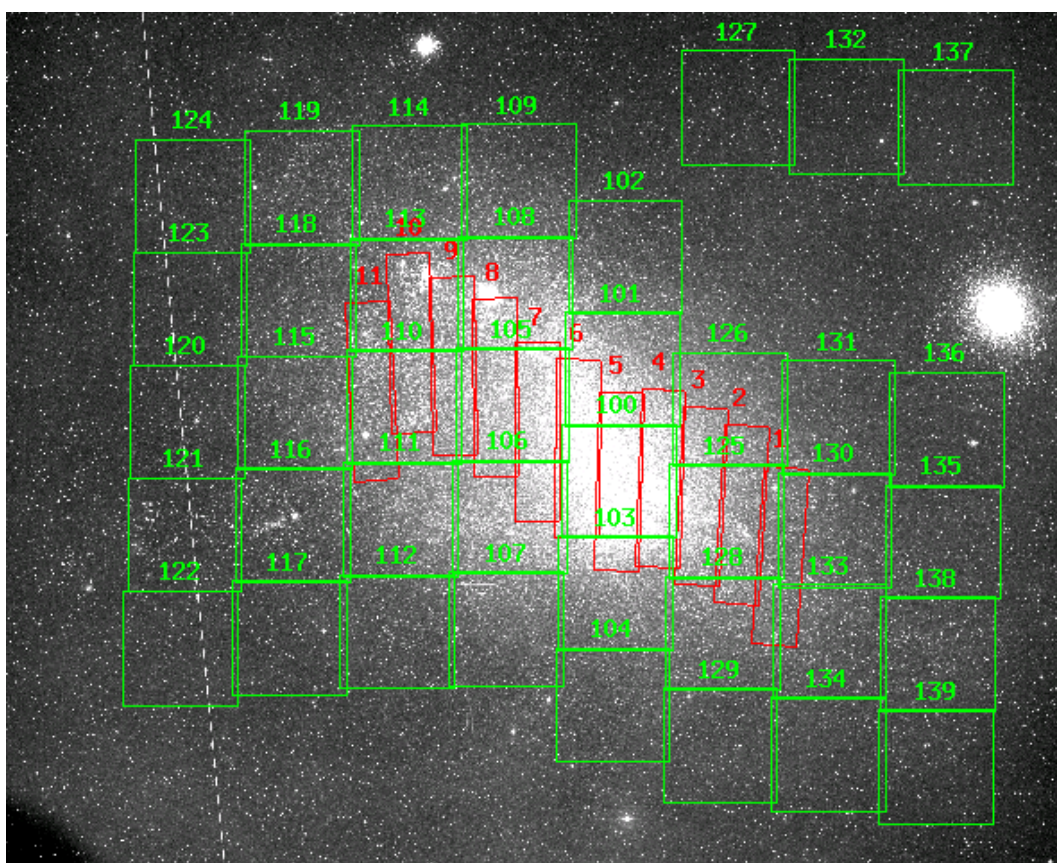
2003-ban kezdtük meg a déli égbolton látható gömbhalmazok CCD fotometriai vizsgálatait. Értekezésem ezen fejezetében az NGC 362-re vonatkozó eredményeimet ismertetem. Az NGC 362 egyike a viszonylag fényes és kompakt déli halmazoknak, azonban a déli égbolton található két közeli és nagy látszó kiterjedésű, így könnyen vizsgálható objektum - a 47 Tuc és az ω Cen - mellett kevésbé tanulmányozott. A halmaz látóirányban a Kis Magellán-felhő északi pereme mellett helyezkedik el, közepének pontos koordinátái: $\alpha = 01^h03^m14^s$, $\delta = -70^\circ50'53''0$ (J2000.0), $l = 301,^\circ5$, $b = -46,^\circ2$. A gömbhalmazok egyik legátfogóbb katalógusában (Harris, 1996) szereplő alapvető adatok: a Naptól mért távolság 8,5 kpc, hozzávetőleg 9,4 kpc-ra található a Tejútrendszer közepétől, a halmaz fémessége $[Fe/H] = -1,16$, a horizontális ág fényessége $V_{HB} = 15,^m44$, a látóirányú vörössödés mértéke mindössze $E(B - V) = 0,05$. A 16. ábrán a halmaz látható az egyik Siding Spring Observatóriumi V szűrős felvételünkön, ami az 1 méteres Bart Bok távcsővel készült. Az expozíciós idő 180 másodperc volt, észak felfelé, kelet balra található. A 17. ábrán az NGC 362 égbolton elfoglalt helyzete vizsgálható az OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Udalski, 1992) felmérés által lefedett égterülethez viszonyítva. A különböző négyszögek a projekt különböző szakaszaihoz tartozó látómezőket jelölik. Alul a Kis Magellán-felhő, tőle jobbra a 47 Tuc látható, míg fenn található az NGC 362 (észak felfelé, kelet balra van). Az OGLE projekt minden derült éjjel végez méréseket a chilei 1,3 méteres Warsaw távcsővel, így esetünkben ezen elhelyezkedés szerencsés, ugyanis az NGC 362 kívül esik a projekt látómezején - ellenkező esetben már jól ismert lett volna a halmaz változócsillag-populációja.

A gömbhalmazok elméleti modelljei szerint az őket alkotó csillagok ugyanabból a

²<http://www.astro.utoronto.ca/~cclement/cat/C0100m711>



16. ábra. Az NGC 362 az egyik Siding Spring Obszervatóriumi V szűrős felvételünkön, amely az 1 méteres Bart Bok távcsővel készült. Az expozíciós idő 180 másodperc volt, észak felfelé, kelet balra található. A bal alsó sarokban egy fényes csillag beégett képe látható. A kép mérete $26' \times 13'$ (Székely és mksai, 2007a).



17. ábra. Az NGC 362 helyzete az OGLE felmérés által lefedett égterületen. A különböző négyszögek a projekt különböző szakaszaihoz tartozó látómezőket jelölik. Alul a Kis Magellán-felhő, tőle jobbra a 47 Tuc látható, míg fenn található az NGC 362 (észak felfelé, kelet balra van, <http://www.astrouw.edu.pl/~ftp/ogle/>).

1. táblázat. A fotometriai idősor-megfigyelések adatai.

Időpont	Szűrő	Adatpontok	Hosszúság [óra]
2003. július 29.	V	15	1,20
2003. augusztus 2.	V	65	4,33
2003. augusztus 3.	V	42	2,80
2003. augusztus 4.	V	57	3,80
2003. augusztus 5.	V	42	2,80
2003. augusztus 7.	V	56	3,73
2003. augusztus 8.	V	25	1,67
2003. augusztus 9.	V	32	2,13
2003. október 8.	V	31	2,06
2003. október 10.	V	17	1,13
2003. október 13.	V	52	3,46
2003. október 14.	V	59	3,93
2003. október 16.	V	64	4,26
2003. október 17.	V	20	1,33
2003. október 18.	V	19	1,26
2004. október 2.	V	115	6,85
2004. október 5.	V	106	7,46

Landolt mezők V és I: 2003. augusztus 1.

gázfelhőből születtek hozzávetőlegesen ugyanabban az időben, ezért a halmazbeli csillagok fizikai tulajdonságai magát a halmazt reprezentálják. A legutóbbi időkben számos tapasztalati, kalibrált összefüggés látott napvilágot RR Lyrae típusú csillagokra (Jurcsik & Kovács 1996; Kovács & Jurcsik 1996, Jurcsik 1998, Kovács & Walker 2001), amelyek használatával meghatározhatóak ezen változócsillagok fémessége, abszolút fényessége, vörösödése és más fizikai paraméterei a fénygörbék alakjából. Értekezésemben bemutatom az NGC 362-ben lévő RR Lyrae csillagok analízisét, de emellett röviden kitérek más változócsillag-osztályokba tartozó égitestek tulajdonságaira is.

3.2. Az adatfeldolgozás

Az NGC 362 vizsgálatára a két legelterjedtebb obszervációs módszert alkalmaztam, a fotometriai idősor felvételét az egyedi csillagok fényváltozásának követéséhez és spektroszkópiai megfigyeléseket a radiális sebességek meghatározása érdekében. A CCD-s fotometriai idősor vizsgálatok standard V szűrőben készültek az ausztráliai Siding Spring Obszervatóriumban található 1 méteres távcsővel, amely az Ausztrál Nemzeti Egyetem (ANU) műszere. A leképezéshez 3 CCD szegmensét használtunk az egyébként 8 CCD chippel rendelkező Wide Field Imager-nek, az így kapott látómező mérete $\sim 40' \times 26'$. A fotometriai vizsgálatok mellett spektroszkópiai úton meghatároztuk 5 RR Lyrae típusú

2. táblázat. A spektroszkópai megfigyelések adatai.

Időpont	Tartomány	Spektrumok száma	Csillagok
2004. október 25.	R	9, 1, 10	V7, V27, V74
2004. október 26.	R	1, 2, 1	V7, V23, V74
2004. október 27.	R	1	V7
2004. október 28.	R	17	V7
2004. október 29.	R	12, 9	V23, V71
2004. október 30.	R	7	V27
2004. november 1.	R	6, 10	V27, V74
2004. november 2.	R	1, 4	V7, V27

Hullámhossztartomány

$$R = 5794\text{--}6756 \text{ \AA}$$

csillag radiális sebességeit is a pulzációs fázis során. Ehhez az ANU 2,3 méteres Advanced Technology Telescope Double-Beam Spectrograph nevű műszerét vettük igénybe, bár az adatok redukálásánál a két nyalábos spektrográfnak csak a vörös oldali adatát használtuk fel. Az alkalmazott rács 1200 mm^{-1} -es volt, a használt hullámhossz $5800\text{--}6800 \text{ \AA}$ közé esett és a névleges felbontóképesség $\lambda/\Delta\lambda \approx 7000$ volt. 20 perces expozíciós időkkel a spektrumok jel/zaj viszonya az időjárási körülményektől függően 20 és 50 közé esett. A megfigyelésre vonatkozó részletes információk a 1-2. táblázatokban találhatóak.

Az összes adat feldolgozása standard IRAF³ rutinokkal történt beleértve a bias és a flat korrekciót. A halmaz képeinek kiértékelésére egyrészt PSF fotometriát használtam (az IRAF daophot csomagja), másrészt képkivonási technikát alkalmaztunk. Ez utóbbihoz a szintén ingyenes, internetről letölthető ISIS 2.1 szoftvercsomagban található különböző programokat futtattam (Alard, 2000).

A standard fotometria kalibrációkhoz különböző, az égi egyenlítő közelében fekvő Landolt-mezők (Landolt, 1992) csillagait is megfigyeltük a halmaz képeinek felvételekor. Az észlelt Landolt-mezők a következők voltak: SA 109-954, SA 110-503, SA 111-1965, Mark A és SA 113-241. A standard transzformációs koefficienseket a *photcal* taszk segítségével határoztuk meg. A radiális sebességeket keresztkorrelációs módszer számítottuk ki, ehhez a IAU (Nemzetközi Csillagászati Unió) radiálissebesség-standard csillagát (HD 187691) és az *fxcor* taszkot használtuk. A sebességmérés becslött pontossága $\pm 7 \text{ km s}^{-1}$.

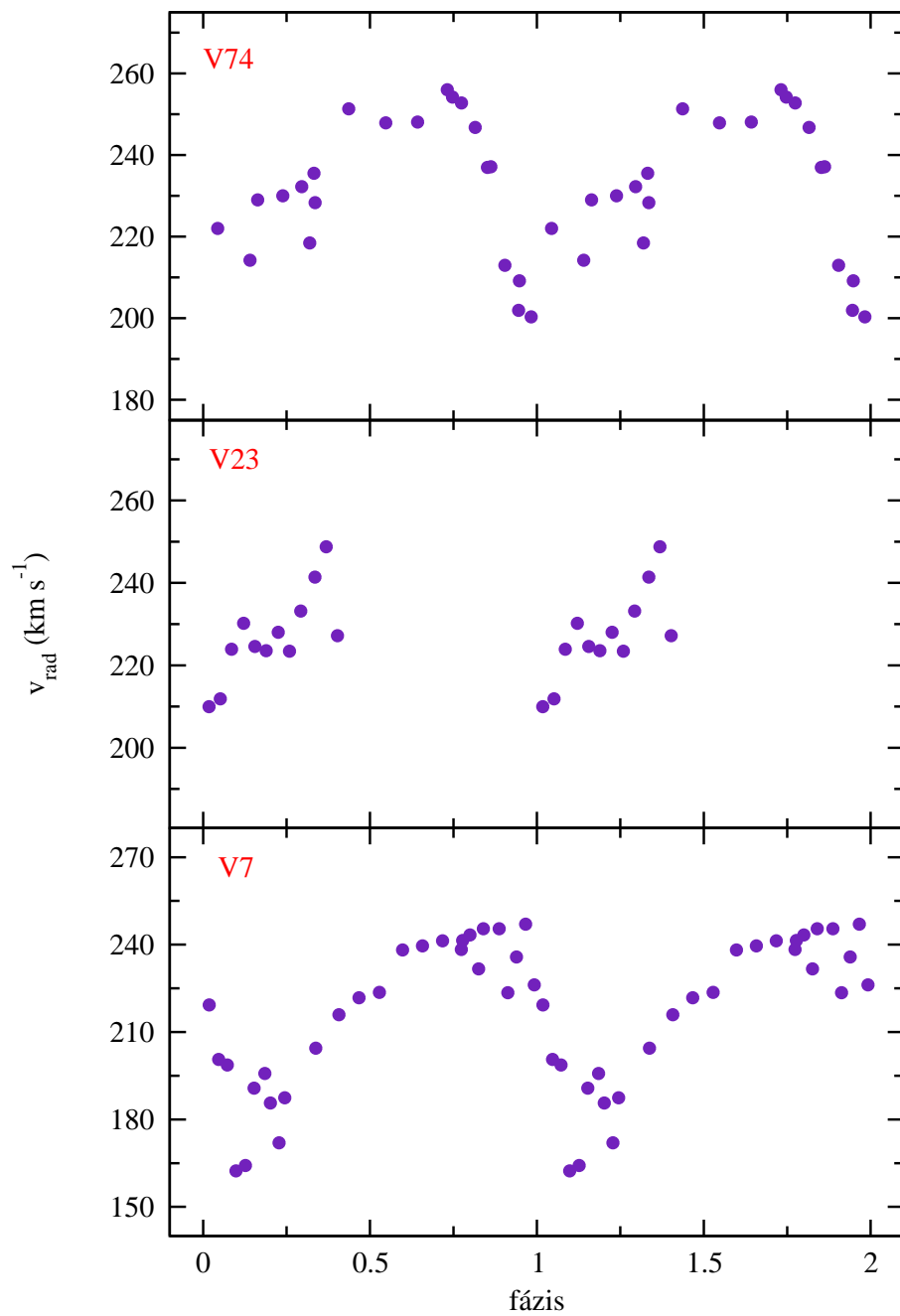
A PSF illesztésből és a képkivonási eljárásból származó fénygörbéket több módszerrel is vizsgáltam lehetséges fényváltozási periódusok detektálása érdekében. Ehhez a következő eljárásokat használtam: Fourier-analízis, fázis diszperziós módszer (PDM, Stelling-

³Image Reduction and Analysis Facility, ingyenesen hozzáférhető képfeldolgozó és analízáló szoftvercsomag, a terjesztésében közreműködik a National Optical Astronomy Observatories, az Association of Universities for Research in Astronomy, és a National Science Foundation.

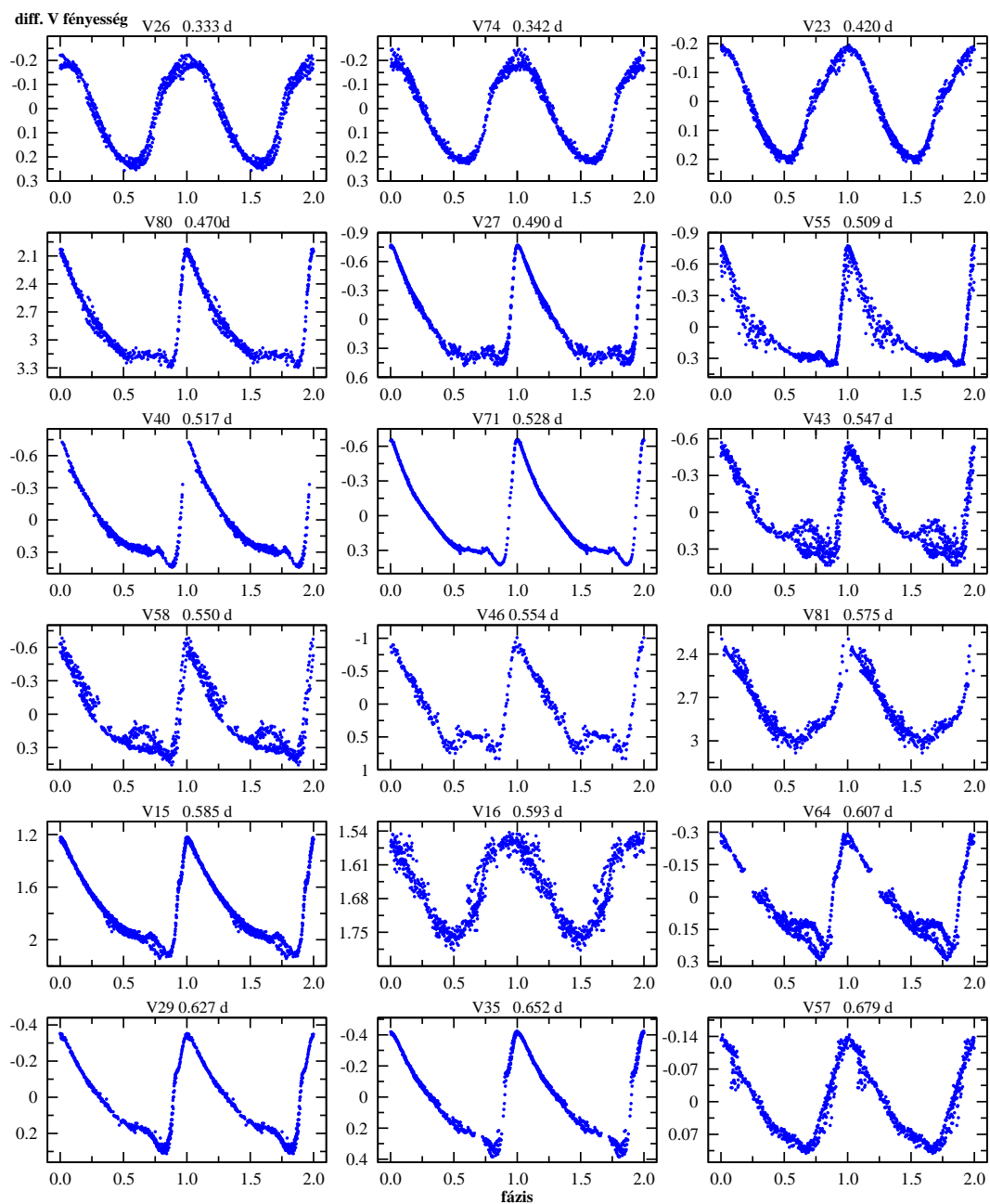
werf, 1978), füzérhossz minimalizálás (Lafler & Kinman, 1965). Ez utóbbi jobb eredményeket ad olyan fénygörbék analizálása esetén, amelyek gyors változásokat mutatnak, például az Algol típusú fedési kettősök keskeny minimumai. Minden fénygörbét egyesével szemügyre vettem és osztályoztam a periódus, az amplitúdó és annak alakja alapján. A változócsillagok nevezéktanában a növekvő rektaszcenzió alapján sorszámoztam.

3.3. Egymódusú RR Lyrae csillagok

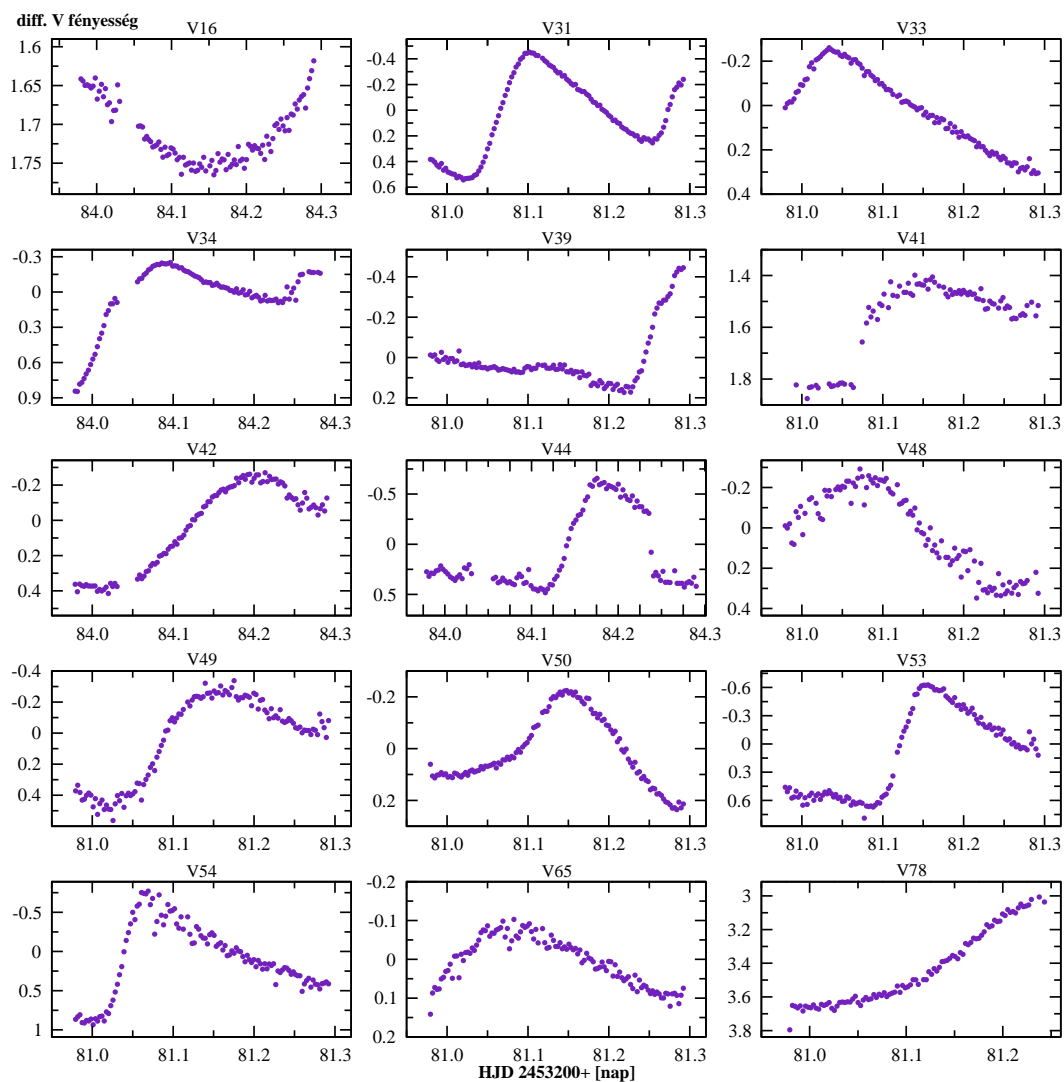
Az NGC 362 3 CCD szegmenses látómezejében a periódusok és a fénygörbék alakjából megítélve 45 darab R Rab/RRc típusú változócsillagot azonosítottam. Bizonyos esetekben csak részben tudtuk megfigyeléseinkkel a teljes pulzációs fázist lefedni, ekkor csak az RR Lyrae-osztályhoz tartozást tudtuk biztosan állítani. A detektált RR Lyrae csillagok túlnyomó többsége hasonló látszó fényességű ($V \approx 15,5$ magnitúdó). Öt csillagnak ezek közül spektroszkópiai úton kimértem a radiális sebesség-görbét, ezek közül hármat mutatok be a 18. ábrán. Az átlagos radiális sebességük ($\approx 220 \text{ km s}^{-1}$) a halmaztagság feltételezését erősíti, mivel magának a halmaznak a radiális sebessége $223,5 \pm 2,0 \text{ km s}^{-1}$ (Fischer és mksai, 1993). A 19-20. ábrákon mutatok be néhány fénygörbét. A 19. ábra fázisba rendezett adatsorokat mutat jól definiált átlag fénygörbealakkal, míg a 20. ábrán csupán egy éjszaka megfigyelt fényváltozás látható, így ezen esetekben a fázisbeli lefedettség csak részleges. A 3. táblázat tartalmazza az alapvető fotometriai adatokat az összes RR Lyrae csillagra. Mivel fotometriai standard csillagokat csupán egyetlen éjszaka észleltünk, a V fényességek és a $V - I$ színindexek az eredendő fotometriai fényváltozás miatt némiképp bizonytalanok, hiszen ezek az értékek például a pulzáció vagy fedés során folyton változnak. Ezt a pontatlanságot úgy küszöböltam ki, hogy kiszámítottam a standard V obszerváció időpontjára a halmaz összes csillagának pulzációs fázisát, így megtudtam a V szűrős fénygörbéből az átlag és az abban a pulzációs fázisban lévő csillag fényessége közti különbséget. Ezután a mért standard V fényességeket korrigáltam a csillagnak megfelelő eltéréssel. Mivel a standard I szűrős korrekciók számára nem álltak rendelkezésre I szűrős fénygörbék, a $V - I$ színindex nagyobb bizonytalansággal terhelt (néhány tized magnitúdó). Azok a csillagok, amelyek esetében a 3. táblázatban lévő V és $V - I$ értékek hiányoznak, egyedi objektumként nem voltak detektálhatóak a standard referenciaképen. Ennek egyik lehetséges oka az összeolvadás (blend), ami egyrészt származhat az eredendően zsúfolt látómezőből, másrészt a standard referenciakép felvételekor meglévő rosszabb seeing miatti nagyobb félértékszélességből. A másik ok az lehet, hogy a standard referenciakép rögzítésekor a csillag épp a CCD szegmensek közötti hézagra esett. A halmaz centrumában lévő változócsillagok esetében az esetleges összeolvadásokat a Hubble Űrtávcső egy archív felvételén ellenőriztem. A kép részletei: a „Forró csillag populációk a gömbhalmazok magjaiban” elnevezésű projekt keretében készült (HST Proposal 6095, S. Djorgovski), 160 másodperces expozíciós idő mellett F439W szűrőben. A



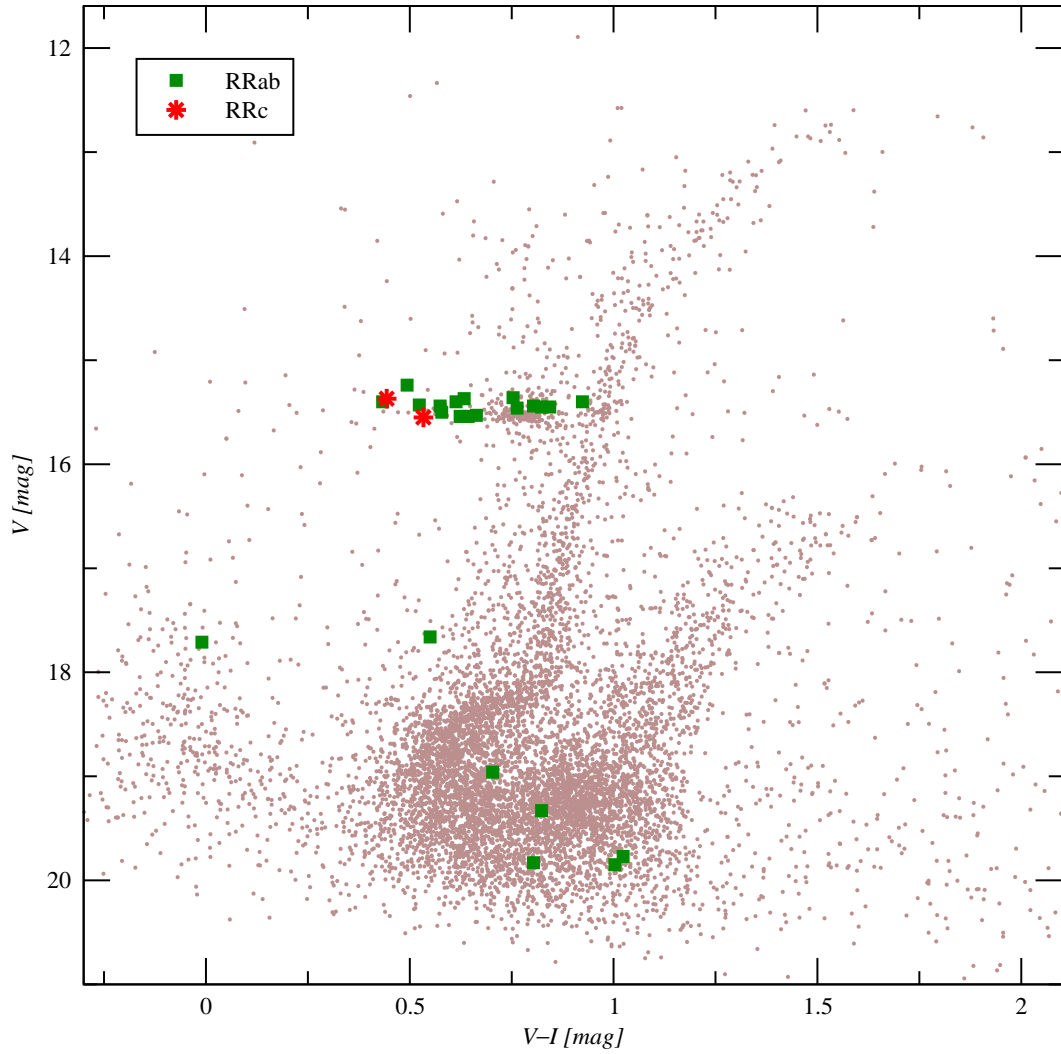
18. ábra. Halmazbeli RR Lyrae csillagok radiálissebesség-görbéi.



19. ábra. Néhány a halmazbeli RR Lyrae csillagok fázisgörbéi közül. Az ábrák növekvő periódus szerint vannak rendezve, V26-tól ($P=0,333\text{d}$) V57-ig ($P=0,679\text{d}$).



20. ábra. Néhány a halmazbeli RR Lyrae csillagok fénygörbéi közül.



21. ábra. Halmazbeli RR Lyrae csillagok az NGC 362 szín–fényesség-diagramján.

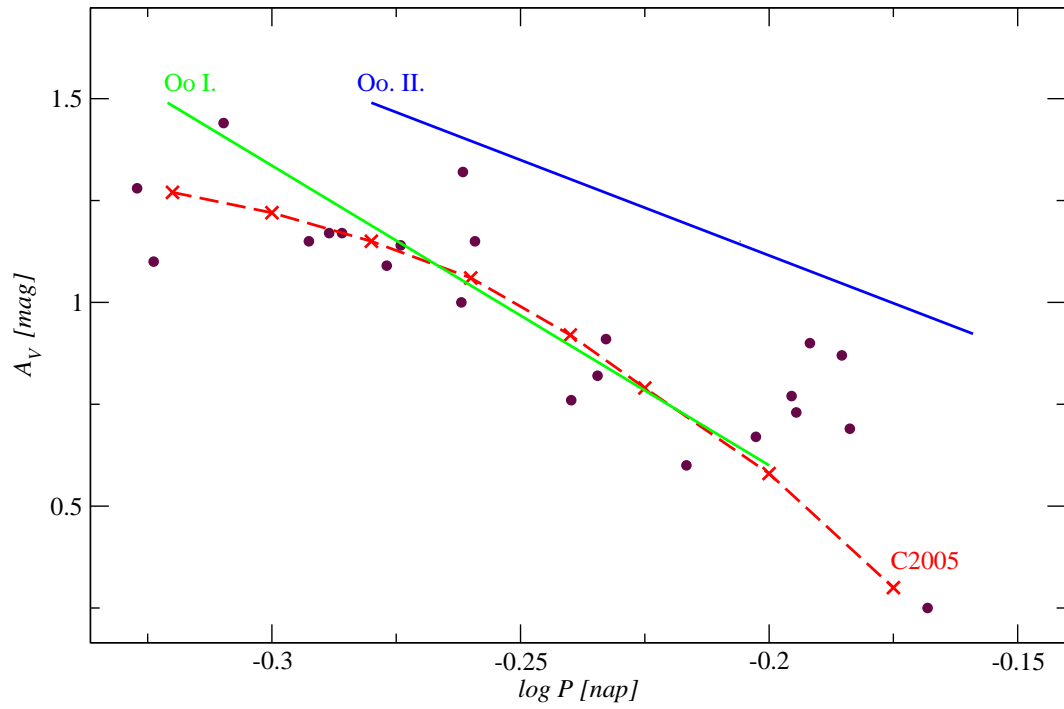
3. táblázat utolsó, megjegyzések oszlopában a már korábban ismert, a szakirodalomban szereplő változócsillagok azonosítóit tüntettem fel.

A 21. ábrán a megbízható és kalibrált fotometriával rendelkező RR Lyrae csillagokat ábrázoltam a halmaz szín–fényesség-diagramján. Ezen csillagok döntő többsége a halmaz horizontális ágára esik, megerősítve ezzel a halmaztagságot. Mindemellett van néhány csillag deviáns pozíciókkal, mint például a V80 és a V81 $V \approx 17,6$ -nél. Mindkét csillag az NGC 362 háttérobjektuma 20 kpc-t meghaladó távolságokkal. Néhány egyéb RR Lyrae csillag is látszik $V = 19 - 20$ magnitúdó környékén, ezek a Kis Magellán-felhőhöz tartoznak.

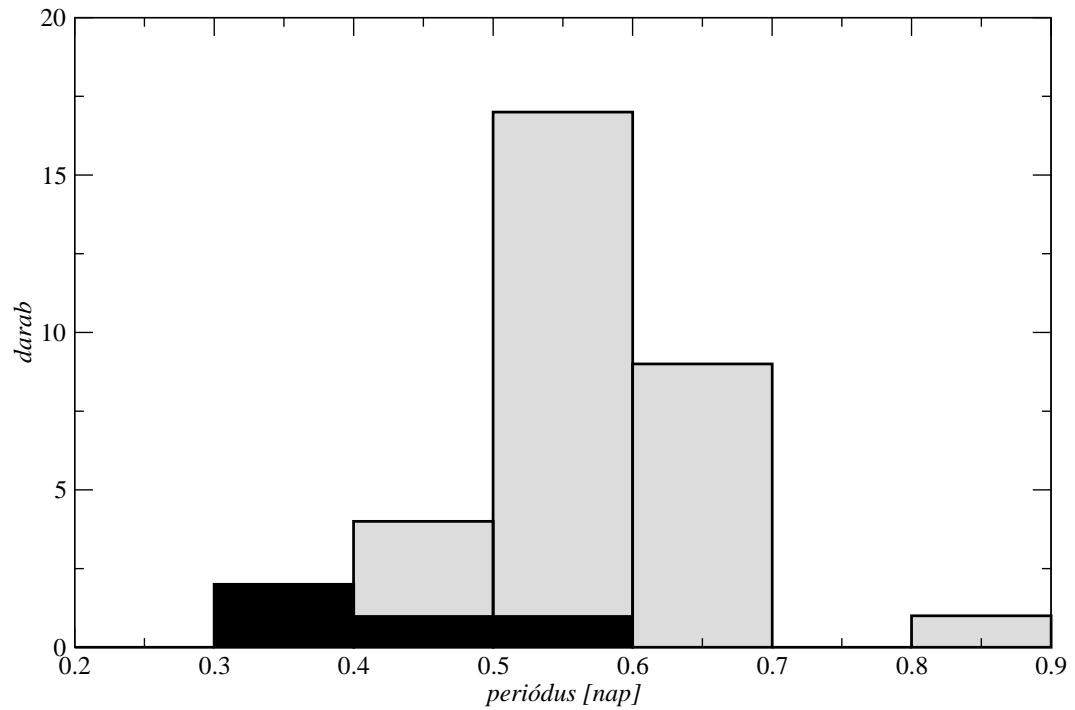
Összességében 28 RR Lyrae csillagra tudtam pontos periódusokat, amplitúdókat és epochákat meghatározni, ezek közül 4 darab ($\approx 14\%$) az RRc altípusba tartozik, melynek jellemzője az első felhangban történő pulzáció. Ez a meglehetősen alacsony százalék arra utal, hogy a halmaz RRc típusú csillagokban szegény (Castellani és mksai, 2003 első ábrája), ami karakterisztikusan az Oosterhoff-féle osztályozás I. típusára jellemző (Oos-

3. táblázat. RR Lyrae csillagok az NGC 362 látómezejében. A megadott koordináták pontossága $\pm 0.1 - 0.2''$. A típusokhoz tartozó megjegyzések: 1. erős Blazskó-moduláció, a teljes fénygörbe változik; 2. gyengébb moduláció a fázis bizonyos részein; 3. összeolvadó csillagok; 4. bizonytalan. Az utolsó oszlop tartalmazza a már ismert változócsillagok egyéb elnevezését: SAW xxx — Sawyer (1931); SMC Vxxx — Samus és mksai (2004); MA 1315 — Meyssonier & Azzopardi (1993); SSP xx és HV xx — Sharpee és mksai (2002).

Név	α [hh : mm: ss]	δ [° : ' : '']	P [nap]	V	V – I	Ampl. [mag]	Epocha [HJD – 2 450 000]	Típus	Megjegy.
V1	1:00:56,64	–71:01:43,8	0,52835			0,55	2860,1765	RRab	halo/SMC, SSP 23
V6	1:01:49,14	–71:07:36,9	0,30250	18,96	0,71	1,07	3284,1702	RRab	halo/SMC
V7	1:01:54,55	–70:46:59,7	0,54753	15,80	–0,12	1,32	2854,2440	RRab ¹	SMC V1670
V8	1:01:56,71	–71:10:00,2	0,29218	19,33	0,83	0,98	3284,1647	RRab	halo/SMC, SSP 29
V10	1:01:58,12	–70:50:29,8						RR	
V12	1:02:00,15	–70:59:02,3		19,77	1,03	0,35		RR	halo/SMC
V15	1:02:24,02	–70:51:56,4	0,58506	15,55	0,58	0,91	2927,0715	RRab ²	SAW V1, SMC V1712
V16	1:02:24,06	–71:05:13,5	0,59339	16,47	0,11	0,25	2927,1882	RRc ⁴	MA 1315
V23	1:02:46,55	–70:51:16,7	0,42023	15,37	0,45	0,41	3281,0256	RRc ²	SAW V10, SMC V1740
V26	1:02:57,22	–70:50:40,8	0,33329	15,07	1,09	0,47	3281,2486	RRc ²	
V27	1:02:58,08	–70:51:23,6	0,49009	15,50	0,44	1,44	3281,0826	RRab ²	SAW V5, SMC V1572
V29	1:03:01,93	–70:49:43,2	0,62709	15,44	0,58	0,67	3284,2818	RRab	
V31	1:03:04,29	–70:51:19,8	~0,5	14,62:	0,38:	0,6		RR ³	SMC V1757
V33	1:03:05,31	–70:51:03,7	0,63895			0,73	3281,0148	RRab ²	
V34	1:03:07,23	–70:50:53,4	0,63757	15,24	0,50	0,77	2927,0661	RRab	
V35	1:03:07,55	–70:52:49,2	0,65256	15,46	0,64	0,87	3284,1213	RRab	SAW V12, SMC V1760
V37	1:03:07,88	–70:50:38,7		14,48	0,34			RR ³	
V38	1:03:07,92	–70:50:42,4		15,45	0,85			RR	
V39	1:03:08,06	–70:50:06,8	0,58277			0,82	2855,2943	RRab ²	
V40	1:03:09,08	–70:52:00,2	0,51772	14,96	0,88	1,17	3284,0559	RRab ²	SMC V1762
V41	1:03:09,16	–70:49:45,1		15,44	0,81	0,54		RR	
V42	1:03:09,17	–70:50:43,2	0,655	15,43	0,53	0,69	3284,2027	RRab	
V43	1:03:11,31	–70:50:25,4	0,54714	15,40	0,93	1,00	3281,1316	RRab	
V44	1:03:11,62	–70:50:46,8	0,532	13,60:	1,08:	1,14	3284,1753	RRab ³	
V45	1:03:11,62	–70:50:51,1	0,503	14,03	0,62			RRab	
V46	1:03:12,52	–70:50:49,8	0,55417	12,98:	0,63:	1,85	3281,1178	RRab ³	
V48	1:03:13,89	–70:50:53,1						RR	
V49	1:03:14,09	–70:50:41,5	0,643			0,90	3281,1589	RRab	
V50	1:03:14,50	–70:51:50,7		15,45:	0,83:			RR ³	
V53	1:03:17,19	–70:50:43,4	0,532					RRab	
V54	1:03:17,28	–70:50:37,9	0,528					RRab	
V55	1:03:17,57	–70:50:15,7	0,50984	15,49	–0,12	1,15	3284,1132	RRab	SMC V1780
V57	1:03:17,63	–70:49:27,4	0,67901	15,54	0,65	0,25	2929,2059	RRab	
V58	1:03:18,56	–70:51:16,7	0,55060	13,40	1,33	1,15	3281,1316	RRab ¹	
V62	1:03:21,30	–70:50:35,2		15,56	0,97			RR	
V64	1:03:22,87	–70:50:35,8	0,60726	15,50	0,76	0,60	2929,1598	RRab	
V65	1:03:24,17	–70:50:43,7	0,691					RRab ³	
V67	1:03:31,24	–70:50:41,7	0,51464	15,52	0,62	1,17	3281,0691	RRab ¹	SAW V6, SMC V1800
V68	1:03:32,57	–70:53:19,7	0,47446	15,60	1,07	1,10	3284,1810	RRab ¹	SAW V3, SMC V1804
V71	1:03:40,35	–70:51:18,7	0,52856	15,54	0,63	1,09	3281,0038	RRab	SAW V7, SMC V1816
V73	1:03:50,37	–70:37:51,7		19,83	0,81	0,9		RR	halo/SMC
V74	1:03:56,72	–70:46:19,0	0,34249	15,55	0,54	0,48	3281,2160	RRc	
V78	1:04:56,99	–70:44:12,2	0,83238			0,72	2854,2549	RRab ²	
V80	1:05:14,82	–71:03:10,1	0,47084	17,66	0,55	1,28	3281,1234	RRab	halo
V81	1:05:33,24	–71:00:43,4	0,57571	17,71	–0,01	0,76	2921,1516	RRab ²	halo



22. ábra. A halmazhoz tartozó RR Lyrae csillagok Bailey-diagramja. Folytonos vonalak: Clement & Rowe (2000); szaggatott vonal: Cacciari és mksai (2005).



23. ábra. Az RR Lyrae csillagok periódusainak eloszlása. A sötét régió az RRc altípust jelöli.

terhoff 1939). Az újonnan felfedezett csillagok bevonásával kiszámítottam az RR Lyrae változócsillagok fajlagos gyakoriságát: $S_{RR} = N_{RR} \times 10^{0,4(7,5+M_V)} \approx 16$. A meghatározott periódusok hisztogramja (23. ábra) alapján úgy tűnik, hogy az RRab csillagok nagy részének periódusa 0,5 és 0,6 nap közé esik, a 24 RRab csillag átlagperiódusa $\langle P_{ab} \rangle = 0,585$ vagy $\langle \log P_{ab} \rangle = -0,237$. A periódus–amplitúdó közti összefüggést leíró Bailey-diagram, szorosan követi Clement & Rowe (2000) és Cacciari és mksai (2005) által megadott Oosterhoff I. típushoz tartozó vonalát, amint az a 22. ábrán is látható. Mindkét említett tulajdonság konzisztens az Oosterhoff I. osztállyal.

3.4. Az RR Lyrae csillagok Fourier-analízise

Az RR Lyrae csillagok fényességének és az abszolút fényességének meghatározása érdekében Fourier-polinomokat illesztettem a fázisgörbékre. Az alaplómodusban pulzáló (hosszabb periódus, aszimmetrikus fénygörbealak, nagyobb amplitúdó) RRab csillagok fénygörbéinek Fourier felbontása a következő képlettel történik:

$$m(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos\left(\frac{2\pi}{P}(t - E) + \Phi_k\right) \quad (10)$$

ahol $m(t)$ a fényesség adott t pillanatban, P a pulzációs periódus, E az epocha. A analízis során felhasznált, az amplitúdók arányaira és a fázisok különbségeire vonatkozó Fourier-koefficiensek a következők:

$$R_{ji} \equiv \frac{A_j}{A_i}, \quad \Phi_{ji} \equiv \Phi_j - j\Phi_i \quad (11)$$

(Simon & Teays, 1982).

Az első felhangban pulzáló („laposabb”, szinuszos fénygörbe, kisebb amplitúdó, rövidebb periódusok) RRc csillagok esetében ez a következő alakra módosul:

$$m(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N A_k' \sin\left(\frac{2\pi}{P}(t - E) + \Phi_k'\right) \quad (12)$$

Egyes, bonyolult alakkal rendelkező fázisgörbék esetében a polinomok rendje elérte a tizet. A Jurcsik és Kovács (1996) cikkében szereplő:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -5,038 - 5,394P + 1,345\Phi_{31} \quad (13)$$

3. egyenletet felhasználva megbecsültem az átlagos vastartalmat 13 RR Lyrae csillagra. Ezeknek az objektumoknak a fázisgörbéi alacsony szórással rendelkeznek, valamint fázisbeli lefedettségük jónak mondható, azaz mind a minimumok, mind a maximumok jól láthatóak a görbéken, emellett nem mutatnak fénygörbe-modulációt, amely meghamisí-

4. táblázat. Néhány kiválasztott RRab csillag Fourier- és különböző fizikai paramétereit. Megjegyzések: [†] Blazskó-effektus jelenléte. ^x Összeolvadt csillagok. * Elő- vagy háttér-csillag, a halmaz átlagába nem számít bele.

Csillag	ϕ_1	ϕ_3	ϕ_4	A_1	P [nap]	$(V-I)_0$	$(V-K)_0$	[Fe/H]	$\log T_{\text{eff}}$	$\log L/L_{\odot}$	M_V	D [kpc]
V15	0,752	1,242	1,658	0,308	0,5851	0,52	0,59	-1,11	3,867	1,58	0,80	8,4
V27	0,828	0,917	1,247	0,494	0,4901	0,55	1,02	-1,34	3,819	1,59	0,79	8,3
V29	0,736	1,414	1,938	0,221	0,6271	0,51	0,38	-1,04	3,890	1,58	0,80	7,9
V35	0,805	1,689	5,513	0,267	0,6525	0,67	-0,74	-1,08	4,015	1,60	0,75	8,2
V40	0,698	0,982	0,919	0,215	0,5177	0,48	0,67	-0,88	3,858	1,53	0,93	6,0
V43	0,795	0,992	1,410	0,299	0,5471	0,52	0,71	-1,41	3,854	1,58	0,82	7,8
V55	0,917	0,988	0,965	0,290	0,5098	0,54	0,85	-1,71	3,840	1,58	0,83	8,2
V58 ^{x,*}	0,822	1,182	1,239	0,335	0,5506	0,54	0,76	-1,28	3,849	1,58	0,81	3,1
V64	0,886	1,838	-0,293	0,195	0,6072	0,62	0,78	-0,96	3,845	1,56	0,84	8,1
V67 [†]	0,606	0,780	0,981	0,339	0,5146	0,49	0,82	-0,76	3,840	1,54	0,88	8,0
V71	0,739	0,933	1,152	0,375	0,5286	0,53	0,85	-1,16	3,838	1,57	0,82	8,2
V80 [*]	0,904	1,073	1,450	0,427	0,4708	0,29	0,89	-1,33	3,834	1,57	0,84	22
V81 [*]	1,049	0,914	1,770	0,283	0,5757	0,40	0,75	-2,69	3,854	1,66	0,70	24
Átlag	0,78	1,18	1,52	0,30	0,557	0,51	0,60	-1,16	3,865	1,57	0,82	7,9
σ	0,08	0,32	1,37	0,08	0,05	0,08	0,45	0,25	0,05	0,14	0,04	0,6

5. táblázat. Néhány kiválasztott RRC csillag Fourier- és fizikai paramétereit.

Csillag	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	A_4	P [nap]	M/M_{\odot}	$\log L/L_{\odot}$	$\log T_{\text{eff}}$	$\log Y$	M_V	D [kpc]
V23	0,045	0,498	1,706	0,0056	0,4202	1,052	1,93	3,821	-1,042	0,814	7,7
V26	-0,160	1,670	0,313	0,0083	0,3333	1,134	1,83	3,839	-0,990	0,816	6,7
V74	-0,145	1,233	0,259	0,0087	0,3425	1,179	1,88	3,838	-1,001	0,826	8,3
Átlag	-0,086	1,133	0,757	0,0075	0,365	1,121	1,89	3,833	-1,011	0,818	7,6
σ	0,09	0,48	0,67	0,001	0,04	0,05	0,02	0,008	0,022	0,005	0,7

taná az analízist. Ezek után meghatároztam ezen csillagok abszolút fényességét, amelyhez Kovács & Jurcsik (1996) következő fényesség-luminozitás összefüggését használtuk fel:

$$M_V = 0,19[\text{Fe}/\text{H}] + 1,04. \quad (14)$$

Az eredményeket összevetve a pulzációs fázisra korrigált látszó fényességekkel, kiszámítottuk az egyedi csillagokra vonatkozó távolság modulust. Egyéb fizikai paramétereket (például effektív hőmérséklet, luminozitás) is meghatároztuk felhasználva Morgan és mksai (2005), Kovács (1998) és Jurcsik (1998) empirikusan kalibrált egyenleteit, amelyeket az alábbiakban összegzünk. A Fourier-analízis eredményei a 4-5. táblázatokban láthatóak.

A táblázatokban feltüntetett eredmények tisztán mutatják, hogy a tanulmányozott RR Lyrae csillagok többségének számított értékei egy viszonylag szűk tartományban találhatóak. A V58 távolsága hibás, mivel a csillag képe összeolvadt egy másik csillaggal, de a többi - távolságtól független - paramétere hasonló a többi változócsillag számított paraméteréhez. A halmaz kiszámított átlagos fényessége jó egyezésben van az irodalomban található értékekkel, például Caldwell (1988) és Davidge (2000), a távolság azon-

ban némiképp kisebbnek adódott, de még összevethető Harris (1996) 8,5 kiloparszekes távolságával. Összefoglalásképpen elmondható, hogy az NGC 362-ben található RR Lyrae csillagok alapján becsült halmazparaméterek igen jól meghatározottak, értékeik pedig hibahatáron belül megegyeznek a más módszerekkel függetlenül kapott eredményekkel. Mindez azért fontos, mert vizsgálataim is igazolják az RR Lyrae-kalibrációk univerzális felhasználhatóságát, amelyek a jövőben végzett égboltfelmérések során jelentős szerepet kaphatnak.

Az alábbiakban felsorolásszerűen összefoglalom az R Rab csillagok fizikai paramétereinek vizsgálatához felhasznált kalibrációs összefüggéseket (Jurcsik & Kovács, 1996; Kovács & Jurcsik, 1996; Morgan és mksai, 2005; Jurcsik, 1998; Kovács, 1998).

Az átlagos fémességet megadó összefüggés:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -5,038 - 5,394P + 1,345\Phi_{31} \quad (15)$$

Az abszolút vizuális fényesség:

$$M_V = 1,221 - 1,396P - 0,477A_1 + 0,103\Phi_{31} \quad (16)$$

A $(V - K)$ színindex megadása:

$$(V - K)_0 = 1,585 + 1,257P + 0,273A_1 - 0,234\Phi_{31} + 0,062\Phi_{41} \quad (17)$$

Az effektív hőmérsékletet a következőképp kapjuk:

$$\log T_{\text{eff}} = 3,9291 - 0,1112(V - K)_0 - 0,0032[\text{Fe}/\text{H}] \quad (18)$$

A bolometrikus korrekció:

$$BC = 0,06[\text{Fe}/\text{H}] + 0,06 \quad (19)$$

A bolometrikus abszolút fényesség kiszámítása:

$$M_{\text{bol}} = M_V + BC \quad (20)$$

Végül a luminozítás (Nap luminozításban megadva) kifejezése:

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = -0,4(M_{\text{bol}} - 4,75) \quad (21)$$

A csillag tömege (Nap tömegben kifejezve):

$$\log \frac{M}{M_{\odot}} = 0,52 \log P - 0,11 \Phi_{31} + 0,39 \quad (22)$$

A luminozítás (Nap luminozításban kifejezve) kiszámítása:

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 1,04 \log P - 0,058 \Phi_{31} + 2,41 \quad (23)$$

Az effektív hőmérséklet a következőképpen adódik:

$$\log T_{\text{eff}} = 3,775 - 0,1453 \log P + 0,0056 \Phi_{31} \quad (24)$$

A csillag hélium tartalmát a következő kifejezés szolgáltatja:

$$\log Y = -20,26 + 4,935 \log T_{\text{eff}} - 0,2638 \log \frac{M}{M_{\odot}} + 0,3318 \log \frac{L}{L_{\odot}} \quad (25)$$

Az átlagos fémesség megadása:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 3,702 (\log P)^2 + 0,124 (\Phi_{31})^2 - 0,845 \Phi_{31} - 1,023 \Phi_{31} \log P - 2,620 \quad (26)$$

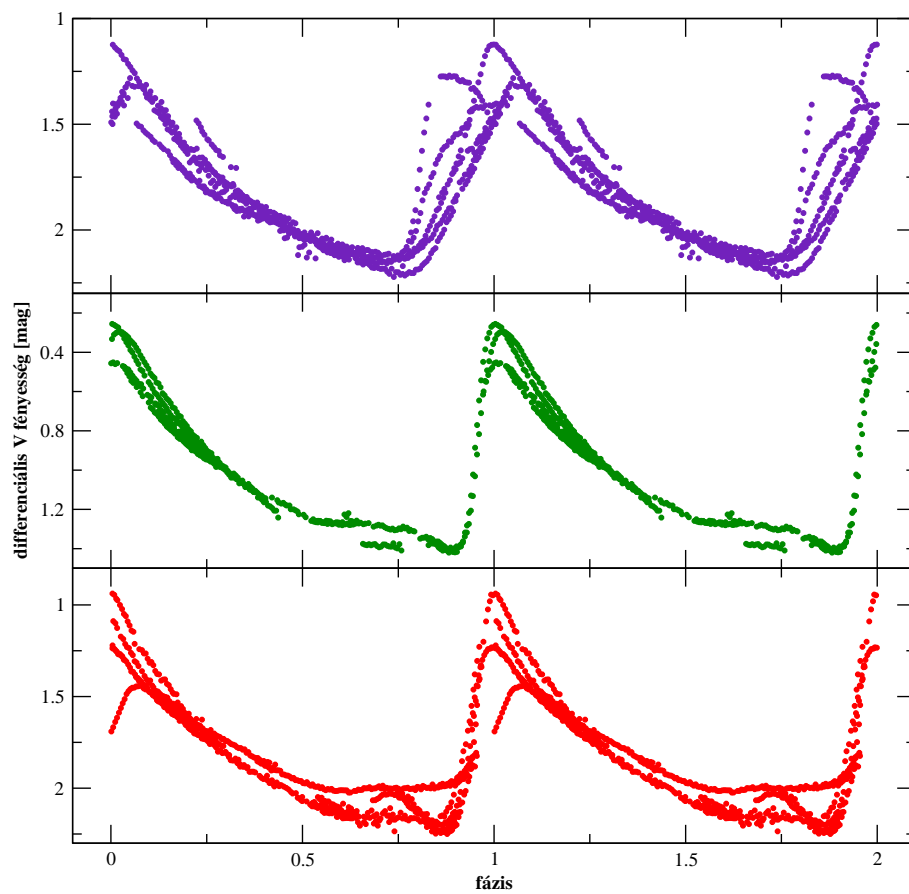
Végül az abszolút vizuális fényességre a következő kifejezést használtam:

$$M_V = 1,261 - 0,961 P - 0,044 \Phi_{31} - 4,447 A_4 \quad (27)$$

3.5. Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagok

Közismert, hogy az RR Lyrae csillagok nagy része (kb. 30% az RRab csillagok és 2% az RRC csillagok közül, Jurcsik és mksai, 2005 és Kovács, 2001) periódikus amplitúdó- és/vagy fázismodulációkat mutat. Ez az úgynevezett Blazskó-effektus, amely mindmáig a klasszikus pulzáció-kutatás egyik legnagyobb megoldatlan rejtélye. Az általunk kiértékelt mintában három változócsillag, a V7, V67 és V68 esetében fedezhetünk fel erős fénygörbe-modulációkat, míg további 14 csillag (V15, V23, V26, V27, V29, V35, V39, V40, V43, V55, V58, V64, V78, V80) mutat kisebb mértékű változásokat a megfigyelések 15 hónapos időtartama alatt. Ezeken kívül a V33, V34 és a V50 esetében szintén megfigyelhető volt kismértékű moduláció, de ezek az objektumok a halmaz nagy mértékben zsúfolt centrumában találhatóak, ebből kifolyólag a fotometriai pontosság nem elégséges.

Feltételezve, hogy ezek a fénygörbe-modulációk reprezentálják az egész mintát, az előfordulási arány meglehetősen magas: a megfigyelések időtartama alatt a halmaz RR Lyrae csillagainak körülbelül a fele mutatott bizonyos mértékű modulációt a fázisba rendezett adatok alapján. Annak a három csillagnak (V7, V67 és V68) a pulzációs fázisba fel-

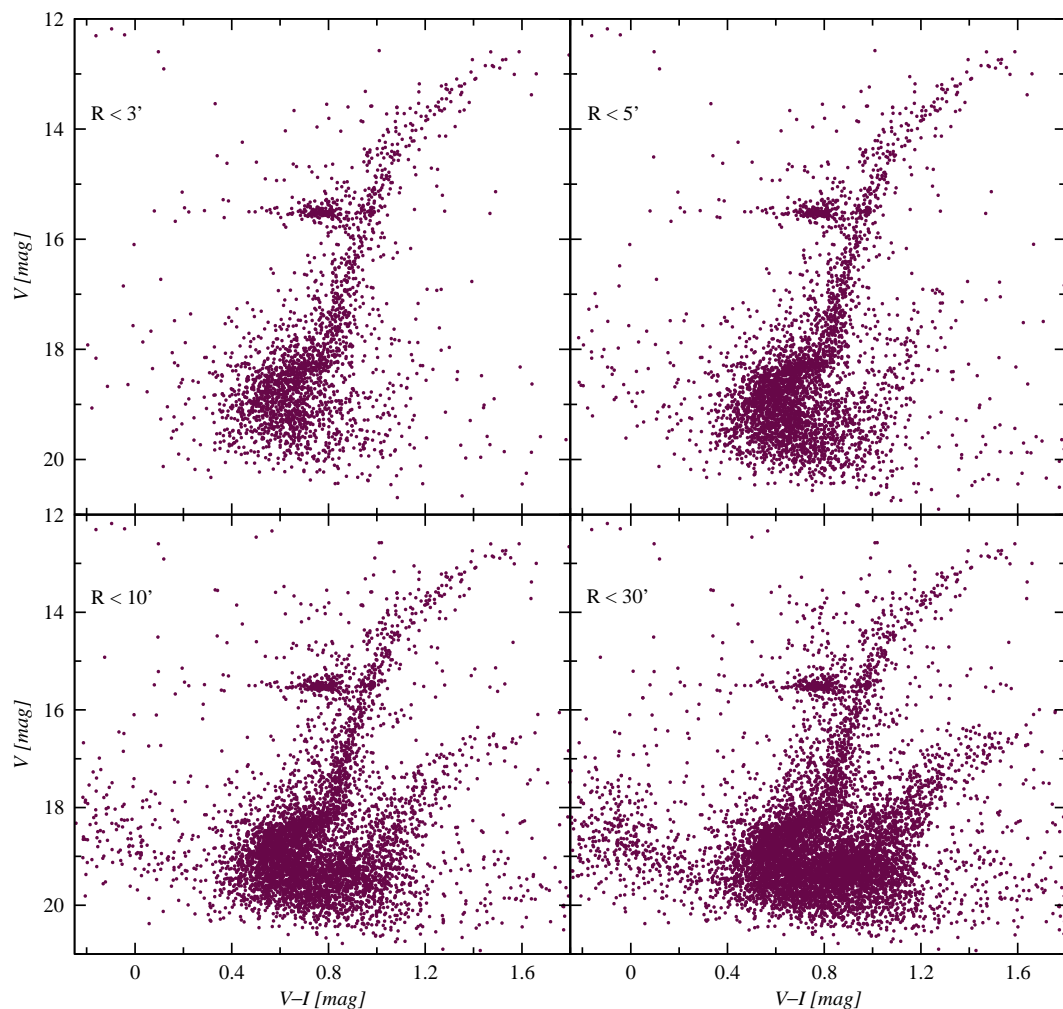


24. ábra. Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagok. Alulról felfelé: V7, V67, V68.

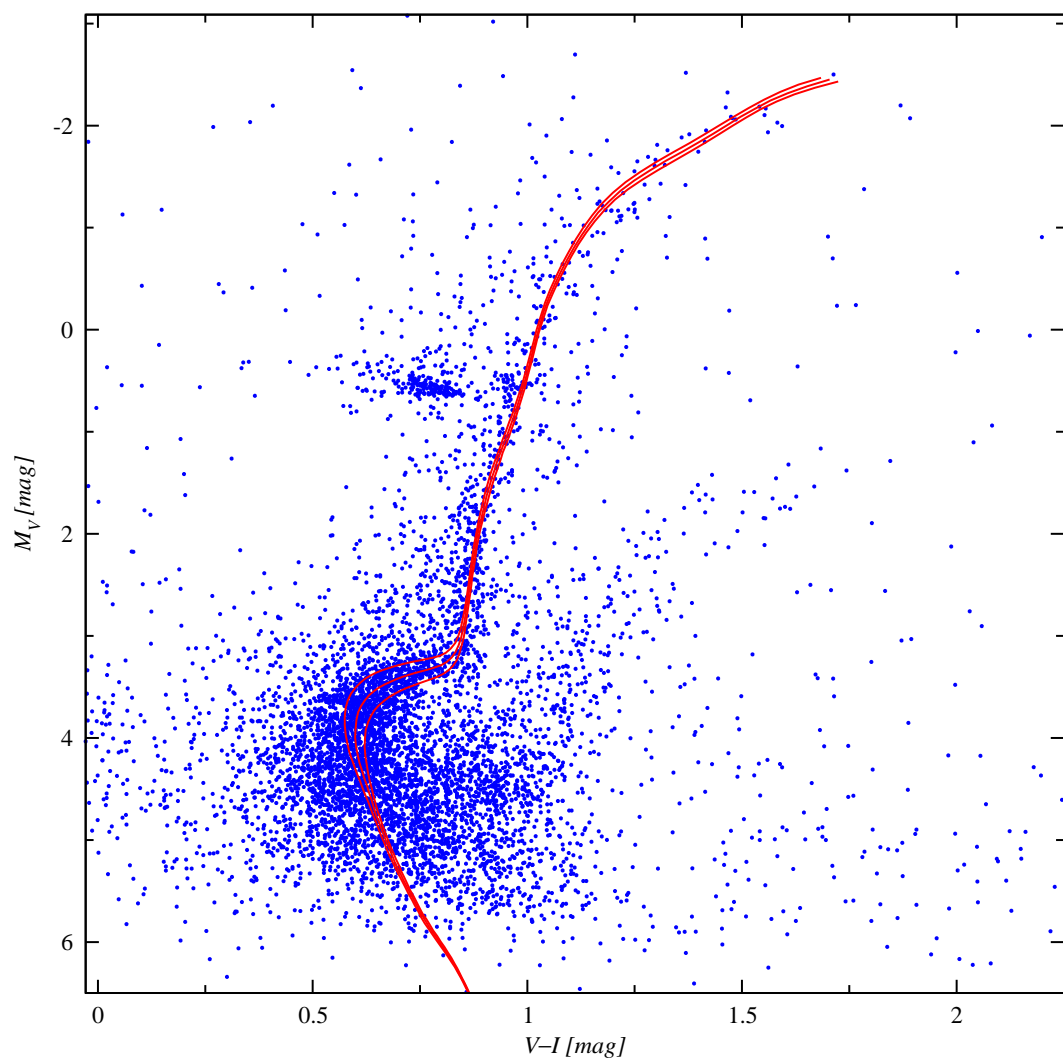
tekert adatai, amely a legerősebb modulációt mutatta, a 24. ábrán láthatóak. Ezen ábrán feltűnő, hogy a fénygörbe alakjának megváltozása megfigyelhető a fázis minden részén. A legutóbbi időkben Jurcsik és munkatársai nagy pontosságú megfigyeléseket végeztek Blazskó-effektust mutató mező RR Lyrae csillagokról (Jurcsik és mksai, 2005; Jurcsik és mksai, 2006; Sódor és mksai, 2006; Sódor és mksai, 2007; Hurta és mksai, 2008; Jurcsik és mksai, 2008; Jurcsik és mksai, 2009a és 2009b). A vizsgálataik olyan különleges tulajdonságait is felfedték a megfigyelt modulációknak, mint a fénygörbe-alakváltozások korlátozottsága egy bizonyos pulzációs fázisra, vagy a kétszeresen periodikus moduláció jelenléte. A mi adatsoraink hossza nem teszi lehetővé ezen speciális jelenségek nyomon követését, mindazonáltal nyilvánvaló, hogy az NGC 362 jelentős számú Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagot tartalmaz. Mivel mindeztáig nem rendelkezünk kielégítő magyarázattal a Blazskó-effektus fizikai természetét illetően, minden olyan gömbhalmaz, amely számos, ilyen modulációt mutató RR Lyrae csillagot tartalmaz, további alapos vizsgálatra érdemes. Az eddigi vizsgálatainkat alapul véve az NGC 362 kiváló objektuma lehet a Blazskó-effektust mutató változócsillagokat megcélzó hosszútávú, homogén fotometriának.

3.6. A szín–fényesség-diagram

A 25. ábra különböző panelei mutatják az NGC 362 körüli csillagok szín–fényesség-diagramjait. Az egyes panelek növekvő sorrendben mutatják a halmaz körüli, kör alakú látóirányú területekben vett csillagokat. Az ehhez kiválasztott sugarak a következők voltak: 3', 5', 10' és 30', a bennük megfigyelt csillagok számai pedig rendre 2450, 4060, 5870 és 8567. A sugár növelésével a diagramon alsó tartományaiban megjelentek a halmaz halvány elő-, illetve háttércsillagai, valamint feltűnt egy meglehetősen jól definiált halvány másodlagos vörös óriás ág (Red Giant Branch, RGB) és egy aszimptotikus óriás ág (Asymptotic Giant Branch, AGB), amelyeket a Kis Magellán-felhő vörös óriáscsillagai rajzolnak ki. Az izokrónillesztés számára ennek következtében a második diagramot - ami 4060 csillagot tartalmaz - választottam, mivel ez elegendően nagy mintát tartalmazott a halmaz csillagai közül, de a nem halmaztag csillagok okozta szennyezés még viszonylag kis mértékű. A halmaz távolságmodulusának, korának, vörösödésének és fémességének meghatározása érdekében Yonsei-Yale (Y^2) izokrónokat (Demarque és mksai, 2004) illesztettem. A legjobb illeszkedést a 11 milliárd éves korhoz tartozó izokrón adta, ennek további, fémességre, héliumtartalomra stb. vonatkozó paraméterei: $Z=0,001$, $Y=0,232$, $[Fe/H]=-1,5$ és $[\alpha/Fe]=0,3$. Az eredményül kapott távolságmodulus $\mu = 14,^{m}95 \pm 0.1$, a vörösödés pedig $E(V - I) = 0,^{m}05$. A 26. ábrán emellett feltüntettem két közel ilyen jól illeszkedő izokrónt, amelyek hasonló mértékű távolság és vörösödés becslést tettek lehetővé, azonban a kapott kor 10, illetve 12 milliárd év. Ez a két illesztés mintegy közrefogja a 11 milliárd éves illesztést a 26. ábrán.



25. ábra. A halmaz különböző területeire vonatkozó V , $V-I$ szín-fényesség-diagramok. A egyes panelek mutatják a különböző csillagszámmal felvett diagramokat, amelyek az NGC 362 közepére centrált, eltérő sugarú területeken található csillagok adatain alapulnak. A külső régiók tisztán mutatják a háttérben található Kis Magellán-felhő csillagai által kirajzolt, másodlagos vörös óriás ág megjelenését. A halmaz fizikai paramétereinek meghatározásakor a jobb felső ($R < 5'$) diagramot használtam.



26. ábra. A halmaz V , $V-I$ szín-fényesség-diagramja az illesztett $Z = 0,001$ izokrónokkal (10, 11 és 12 milliárd év, felülről lefelé). A halmaz paramétere: $\mu_0 = 14,^m82$, $E(V-I) = 0,^m05$

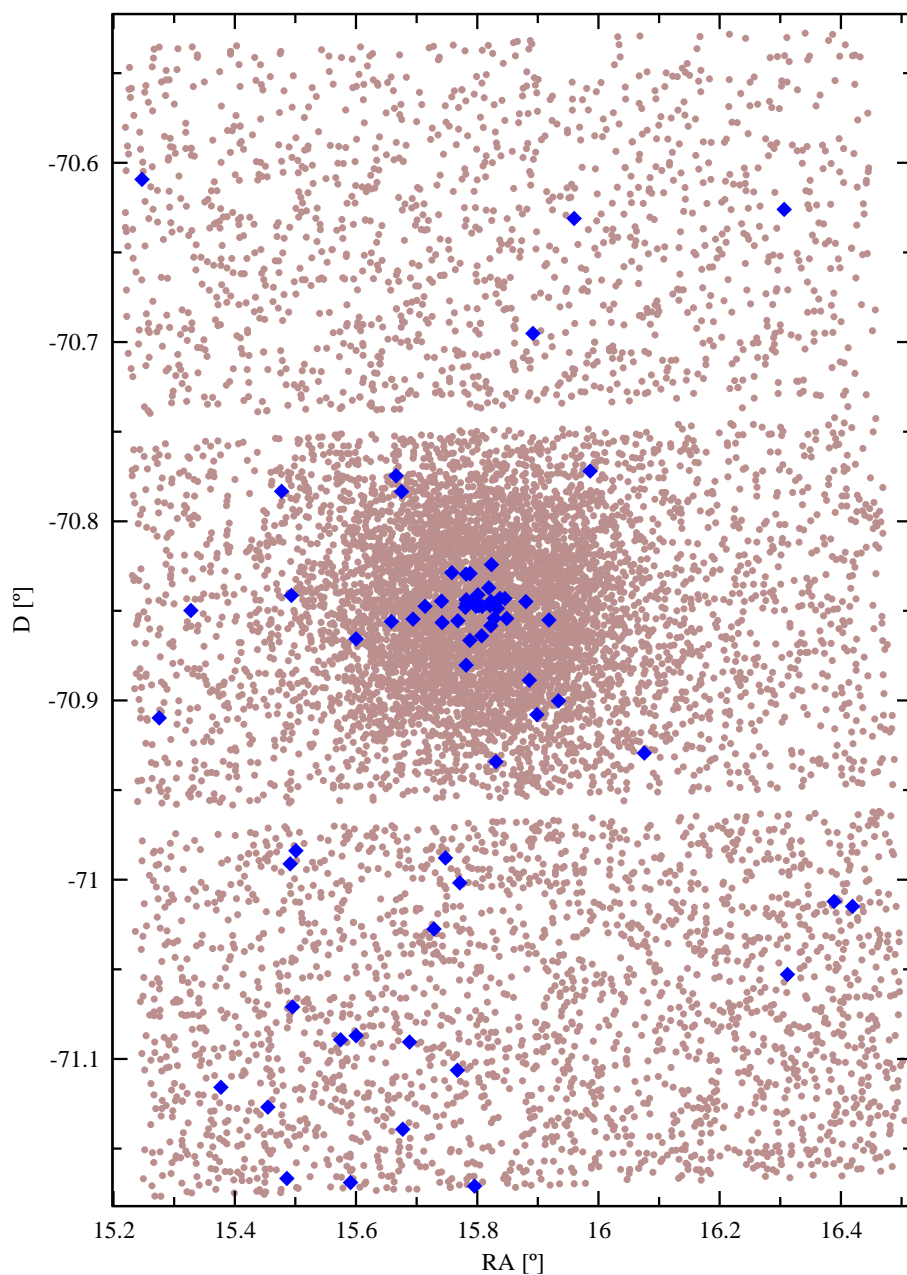
A vörös óriás ág és az aszimptotikus óriás ág között megfigyelhetjük a csillagok aggregációját (Red Clump, RC) $V - I \approx 0,96$ és a $V \approx 15,5$ magnitúdó értékek által megjelölt helyen. Ezen vörös színű csillagcsoportra jellemző színérték ($V - I = 0,92$, Olsen & Salyk, 2002) és abszolút fényesség (a lokális Red Clump-ra vonatkozóan $M_V = 0,73$, Alves és mksai 2002) alapján függetlenül megbecsülhetjük a halmaz távolságát és vörössödését. Az eredményül kapott értékek $-E(V - I) = 0,04$ és $\mu = 14,82$ – jó egyezésben vannak az izokronillesztéssel kapott eredményekkel.

A távolságmodulus extinkcióra való korrekciójához a következő értéket használtam: $E(V - I)/E(B - V) = 1,28$ (adoptálva a következő összefüggéseket: $A_I/E(B - V) = 1,962$ és $A_V/E(B - V) = 3,24$, Savage & Mathis 1979; Schlegel és mksai 1998), ezzel $A_I = 0,08$ értékűnek adódott. Ezen az úton $E(B - V) = 0,04$ értéket kaptam, valamint felhasználva $A_I/A_V = 0,601$ összefüggést az extinkcióra, $A_V = 0,13$ kaptam, ezzel a valódi távolságmodulus $\mu_0 = 14,82 \pm 0,1$.

Az ábrára nézve feltűnik, hogy amíg a horizontális ág vörös oldalán számos csillag található, annak kék oldalán viszont feltűnő a csillagok hiánya (ezt a különleges tulajdonságot a közelmúltban vizsgálta Bellazzini és mksai, 2001, valamint Catelan és mksai, 2001). A 26. ábrára alapozva meghatároztam a következő relatív korra vonatkozó horizontális (a színkülönbség a vörös óriás ág és az elfordulási pont között, a vörös óriás ág színét ott mérjük, ahol az 2,5 magnitúdóval fényesebb az elfordulási pontnál) és vertikális (a horizontális ág és az elfordulási pont V fényessége közti különbség) paramétereit (Rosenberg és mksai 1999): $\delta(V - I)_{2,5} = 0,305 \pm 0,05$ és $\Delta V_{TO}^{HB} = 3,4 \pm 0,1$. Mindkét érték hibahatáron belül egyezik a Rosenberg és mksai (1999) által meghatározott paraméterekkel. A horizontális ág fényessége $V_{HB} = 15,53 \pm 0,08$, és konzisztens az RR Lyrae csillagokon alapuló $M_V(HB) = 0,22[Fe/H] + 0,89$ összefüggés (Gratton és mksai 2003) által szolgáltatott eredménnyel, ami esetünkben $V_{HB} = 15,58$. Emellett kiszámítottam a horizontális ág morfológiájára jellemző L paramétert Lee (1990) definícióját követve: $L = (B - R)/(B + R + V)$, ahol B , R és V a horizontális ágon lévő kék, vörös, illetve a változócsillagok számát jelöli. Eredményül a következő értéket kaptam: $L = -0,855$, ami az eddig rendelkezésre álló értékhez ($-0,87$, Harris 1996) képest pontosabb, köszönhetően a horizontális ágon lévő változócsillagok számára vonatkozó jobb statisztikáknak.

3.7. Egyéb rövid periódusú változócsillagok

Az NGC 362 látómezejében meglehetősen nagy számban találtam egyéb, nem az RR Lyrae osztályba tartozó változócsillagot. A 27. ábrán ábrázoltam annak a 8616 csillagnak az égi koordinátáit, amelyekre a WCS-be (World Coordinate System) történő transzformáció sikerrel járt. Az így kapott ábrán feltüntettem az összes általam detektált változócsillag koordinátáit. Szembetűnő, hogy a halmazhoz tartozó változók a központi régióban foglalnak helyet. Az ábra alsó részén megfigyelhető megnövekedett változócsillag létszám



27. ábra. A változócsillagok RA-Dec pozíciói rávetítve azoknak a csillagoknak a pozícióira, amelyekre a koordináta transzformáció alkalmazása sikerrel járt. Az üres, csillagmentes területek oka a CCD szegmensek közötti hézagok. Figyeljük meg a Kis Magellán-felhő irányába (jobbra lent) növekvő csillagsűrűséget.

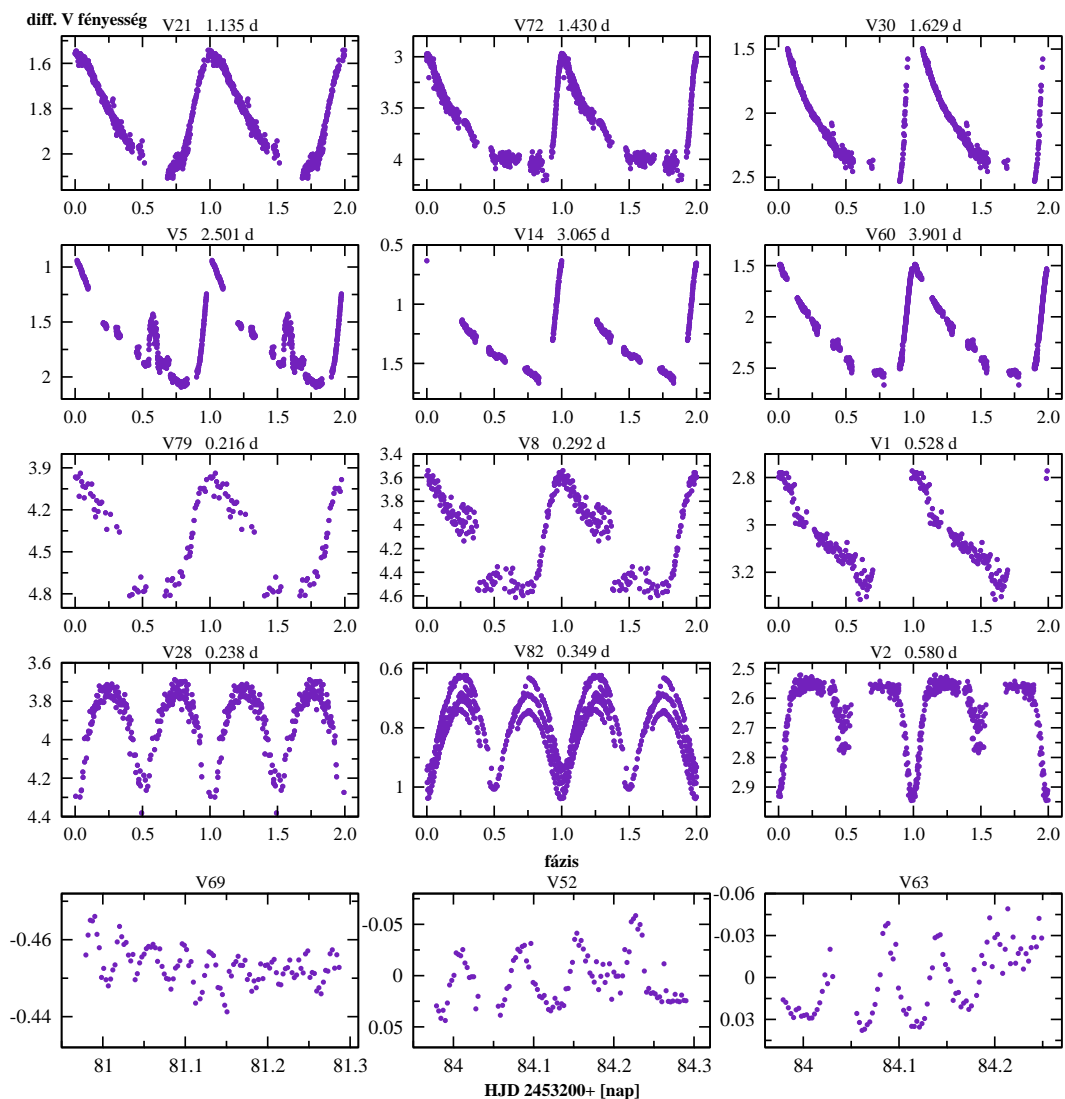
6. táblázat. Egyéb változócsillagok az NGC 362 látómezőjében. Az utolsó oszlop tartalmazza a már ismert változócsillagok egyéb elnevezését: SAW xxx — Sawyer (1931); SMC Vxxx — Samus és mktsai (2004); SSP xx és HV xx — Sharpee és mktsai (2002). DS: δ Scuti / SX Phe csillagok, LPV: hosszú periódusú változócsillagok, EA: Algol típusú fedési kettősök, EW: W UMa típusú fedési kettősök, SRA: félszabályos változócsillag, Cep: cefeida.

Név	α [hh:mm:ss]	δ [°:′:″]	P [nap]	V	V – I	Ampl. [mag]	Epocha [HJD – 2 450 000]	Típus	Megjegyzés
V2	1:00:59,28	–70:36:33,4	0,58022	16,58	0,24	0,42	2926,0898	EA	
V5	1:01:30,52	–71:06:57,4	2,50181	16,51	0,63	1,16	2926,9921	Cep	
V9	1:01:57,97	–70:59:28,4	~1,26	15,65	–0,26	0,38		EW	
V11	1:01:58,90	–71:04:15,6	2,01329	15,83	0,41	0,66		Cep	SMC V1684, HV 1883
V13	1:02:17,92	–71:05:21,9	0,9624	18,49	–0,01	0,58		EA	
V14	1:02:21,92	–71:10:08,3	3,0650	16,28	0,69	1,03	2923,1352	Cep	SMC V1709, HV 1906
V21	1:02:42,53	–71:08:21,6	1,13503	16,66	0,50	0,57	2921,1134	Cep	SSP 32
V22	1:02:45,24	–71:05:26,2	1,59262	16,61	0,47	0,48	2850,1864	Cep	
V28	1:02:59,45	–70:59:16,2	0,23801	18,94	1,11	0,70	3284,1647	EW	
V30	1:03:04,18	–71:06:22,8	1,62998	17,03	0,59	1,05	2926,9921	Cep	
V47	1:03:13,14	–70:51:00,8						EA	
V51	1:03:15,19	–70:50:36,7						SRA	SMC V1774
V52	1:03:17,11	–70:51:28,1		14,68	0,72	0,10		DS/SX	
V56	1:03:17,63	–70:50:49,4		12,30	–0,16			EA	
V60	1:03:19,37	–70:56:03,3	3,90134	15,86	0,44	1,12	2855,2316	Cep	SAW V8
V63	1:03:22,87	–70:51:14,6		15,51	0,70	0,09		DS/SX	
V69	1:03:34,09	–70:41:42,8		13,55	0,35	0,025		DS	
V72	1:03:44,13	–70:54:01,1	1,43055	17,34	0,35	1,19	2929,1706	Cep	SAW V15
V75	1:04:10,11	–70:57:21,5	4,205			0,66		Cep	SMC V1851, HV 214
V79	1:05:15,74	–70:37:35,7	0,21630	19,85	1,01	0,88	3281,0745	HADS	halo/SMC
V82	1:05:38,75	–70:44:09,7	0,34999			0,40	2921,1326	EW	

oka a Kis Magellán-felhő, amely a látómezőn kívül, a déli irányban található.

Néhány kiválasztott fénygörbét a 28. ábrán mutatok be, míg a változócsillagok alapvető paramétereit a 6. táblázatban tüntettem fel. Itt a $V - I$ értékek szintén csak tájékoztató jellegűek az egyszeri standard I mérés következtében. A V fényességeket korrigáltam a fényváltozás fázisának megfelelően, ahogyan azt az RR Lyrae csillagok esetében is tettem. Az általam azonosított változócsillagok között találunk fedési kettősöket (W UMa, illetve Algol típusúakat egyaránt), mezőbeli δ Scuti csillagokat, hosszú periódusú változókat. A legérdekesebb objektumok között számos cefeida található (közülük 3 új felfedezés), amelyek a Kis Magellán-felhő tagjaiként azonosíthatóak. A látóirányú pozícióik közelebb esnek a Kis Magellán-felhőhöz, mint a halmazhoz, ami szintén ezt a feltételezést erősíti.

A 29. ábrán feltüntettem a nem RR Lyrae változócsillagok pozícióját a halmaz szín–fényesség-diagramján. Kék négyzetek jelölik a cefeidákat, amelyek valóban a Kis Magellán-felhő várt instabilitási sávjában helyezkednek el. Ezen felül az átlagos V fényességük szigorúan követi a következő, cefeidákra vonatkozó periódus–fényesség-relációt $V = -2,76 \log P + 17,61$, amely a Kis Magellán-felhőben lévő cefeidák OGLE projekt keretében történő mérésein alapul (Udalski és mktsai 1999). A 30. ábrán mutatom be a kiválasztott cefeida csillagokra történő illesztést. Ezeken felül 4, a halmazhoz tartozó vörös óriáscsillagot azonosítottam, amelyek a halmaz óriás ágán és az aszimptotikus óriás



28. ábra. A látómezőben található változócsillagok közül néhánynak a fénygörbéje, növekvő periódus szerint rendezve. Felső két sor: cefeidák, harmadik sor: Kis Magellán-felhő/haló RR Lyrae csillagok, negyedik sor: fedési kettősök, legalsó sor: δ Scuti/SX Phe csillagok.

7. táblázat. A V63 (felül) és a V69 jelű (alul) δ Scuti csillagok pulzációs frekvenciái.

Frekvencia	ciklus/nap	V amplitúdó
f_1	17,1721	0,014
f_2	5,26044	0,010
f_3	21,4307	0,007
f_4	6,00542	0,006
f_5	11,8310	0,004
f_6	17,8147	0,005

jel/zaj viszony f_6 -nál: 5,0

Frekvencia	ciklus/nap	V amplitúdó
f_1	27,6630	0,003
f_2	33,0097	0,002
f_3	28,7716	0,002
f_4	35,8401	0,001

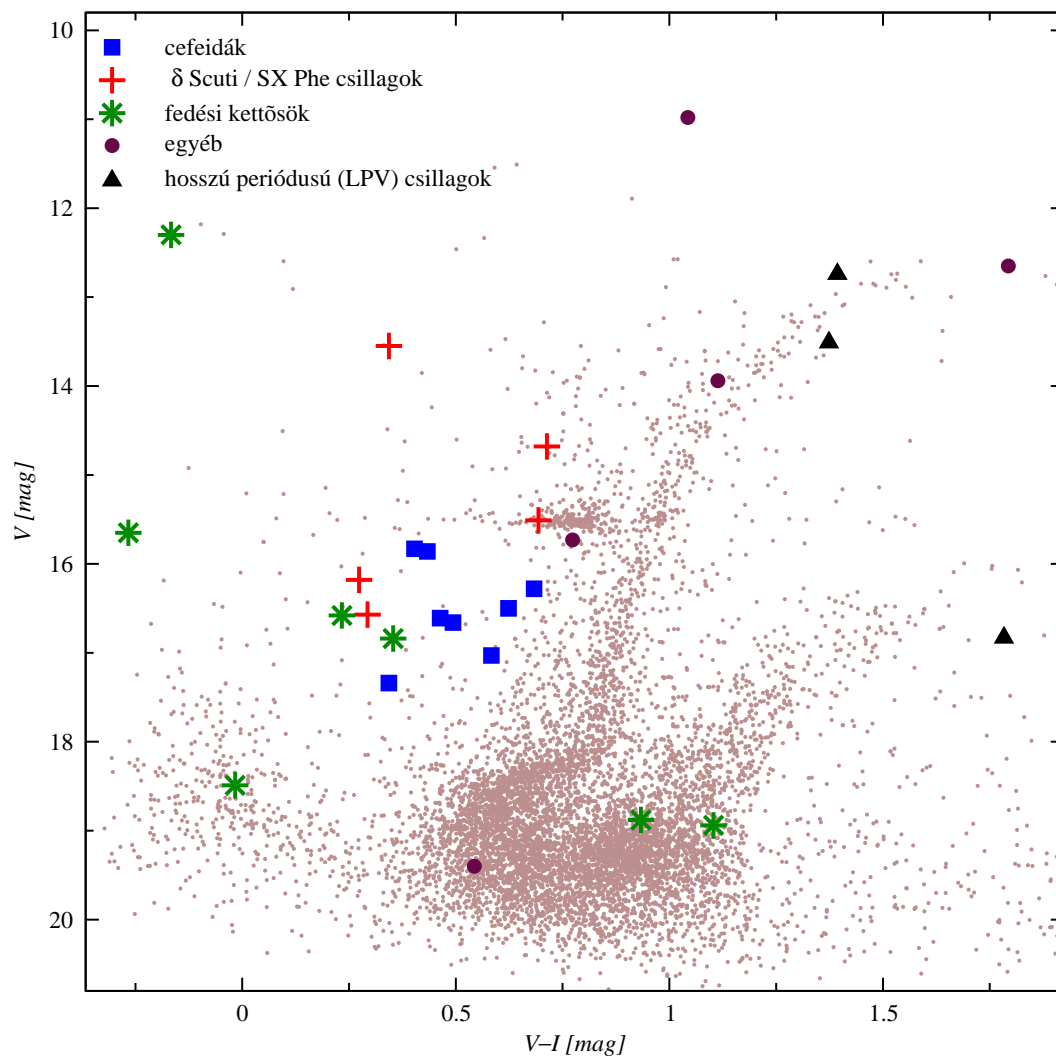
jel/zaj viszony f_4 -nél: 3,9

ágán találhatóak, illetve egy hasonló csillagot a Kis Magellán-felhőben.

A δ Sct típusú változócsillagok látszó fényessége széles tartományt ölel fel, utalva arra, hogy a galaktikus mezőhöz tartoznak. A színe, fényessége és az NGC 362-höz való látszólagos közelsége alapján a V63 jelű csillag a halmazhoz tartozhat, vagyis a változócsillagok SX Phe osztályába sorolható. Két δ Sct csillag, a V63 és a V69, komplex, több periódussal rendelkező fényváltozást mutatott, amelyből meghatározható volt számos pulzációs frekvencia szinusz függvények iteratív illesztésével. Ehhez Lenz & Breger (2005) Period04 programját használtam. Mivel a pulzáció alapos és mélyreható analízise e két csillag esetében túlmutat PhD értekezésem célkitűzésein, csupán az eredményül kapott pulzációs frekvenciákat sorolom fel a 7. táblázatban. Ebben azokat a frekvenciákat tüntettem fel, amelyekre a jel/zaj viszony meghaladta a 4-et (Breger és mksai, 1993). A V63 esetében gyanítjuk, hogy az alacsony frekvenciájú komponenst okozhatja instrumentális effektus és/vagy gyenge mintavételezés. Egyébként a legerősebb módusokra vonatkozó frekvenciaarányok alacsony rendű radiális pulzációra utalnak, amelybe esetleg nem radiális módusok is vegyülhetnek. Végezetül a jól azonosított és osztályokba besorolt változók mellett számos olyan változócsillagot találtam, amelyek esetében sem a periódus, sem a biztos típus meghatározása nem volt lehetséges. Ezeket a csillagokat a 8. táblázatban tüntettem fel.

3.8. Következtetések

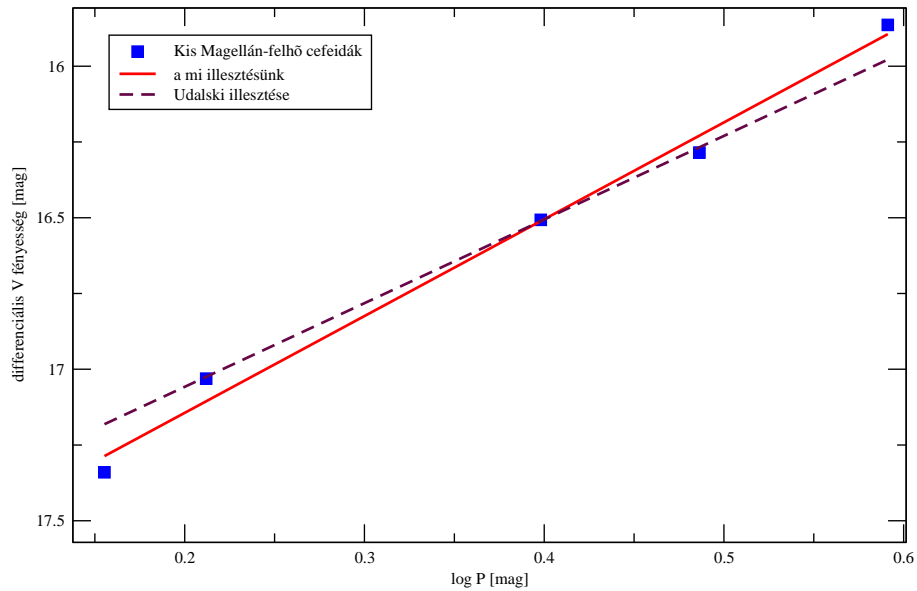
Az NGC 362 vizsgálatainak főbb eredményei az alábbiakban foglalhatóak össze.



29. ábra. Különböző szimbóllummal jelölt mezőbeli változócsillagok (magához a halmazhoz tartozó RR Lyrae csillagok kivételével) az NGC 362 szín–fényesség-diagramján.

8. táblázat. Biztos típus azonosítása és pontos periódus nélküli változócsillagok. DS: δ Scuti / SX Phe csillagok, LPV: hosszú periódusú változócsillagok, EA: fedési kettősök, Cep: cefeida.

Név	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	V	$V-I$	Ampl.	Megjegyzés
V3	1:01:06,09	-70:54:35,5	16,18	0,28	0,1	DS
V4	1:01:18,94	-70:51:01,5	10,98	1,05		
V17	1:02:37,82	-70:51:21,8	13,51	1,38		LPV
V18	1:02:37,93	-70:50:42,3				EA
V19	1:02:39,48	-70:46:28,9	16,83	1,79		LPV
V20	1:02:42,00	-70:47:00,0	16,57	0,30	0,09	DS
V24	1:02:51,13	-70:50:50,3	13,94	1,12		
V25	1:02:54,85	-71:01:39,3	18,23	-0,25	0,8	Cep?
V32	1:03:05,12	-71:00:06,3	16,84	0,36	0,25	EA
V36	1:03:07,84	-70:49:46,6	12,64	1,40		LPV
V56	1:03:17,63	-70:50:49,4	12,30	-0,16		EA
V59	1:03:18,79	-70:50:37,5				
V61	1:03:20,35	-70:50:54,7	12,65	1,80		
V66	1:03:25,43	-70:50:04,3				
V70	1:03:35,11	-70:54:29,2	19,40	0,55		
V76	1:04:18,78	-70:55:45,7	14,76	1,14		Cep?
V77	1:04:26,74	-70:50:09,8				
V83	1:05:40,59	-71:00:53,2	18,88	0,94	0,8	EA
V84	1:06:19,92	-71:04:55,3			0,12	LPV



30. ábra. A Kis Magellán-felhő cefeida csillagain alapuló periódus–fényesség-reláció. A következő csillagok adatait használtam: V5, V14, V30, V60, V72, ezekről állt rendelkezésre megbízható fotometriai adatsor és jól meghatározott fázisgörbék. A folytonos vonal az illesztésemet, míg a szaggatott vonal Udalski és mksai (1999) cikkéből származik.

- PSF és képkivonásos fotometriát alkalmazva 45 RR Lyrae változócsillagot találtam az NGC 362 látómezejében, ezek közül 28 új felfedezés. A képkivonásos technika során eredményül kapott fluxusgörbéket egy egyszerű, általunk kidolgozott eljárással átkonvertáltam magnitúdógörbékké. Ez lehetővé tette az RR Lyrae csillagok számára a szakirodalomban létező empirikus fénygörbealak és fizikai paraméterek közti kalibrációk használatát. Ezek segítségével meghatároztam 16 RR Lyrae csillagra a fémességet, abszolút fényességet, vörösödést és egyéb fizikai paramétereket.
- Az RR Lyrae csillagok között - mind az RRab, mind az RRc altípus esetében - kimagaslóan nagy hányadban találtam modulált fénygörbéket, azaz a Blazskó-effektust. Az NGC 362 ezért kiváló célpontja lehet a Blazskó-effektus vizsgálatának kémiai-lag homogén környezetben.
- Izokrónillesztéssel szintén meghatároztam a halmaz fő paramétereit. Mind az RR Lyrae csillagok, mind a szín-fényesség-diagram analízise a fizikai paraméterek konzisztens együttesére vezetett.
- Számos, egyéb osztályba tartozó változócsillagot fedeztem fel: cefeidákat, a Kis Magellán-felhőben lévő hosszú periódusú változókat, fedési kettősoket, a galaktikus mezőben lévő δ Sct típusú pulzáló csillagokat.

Az NGC 362 főbb fizikai paramétereinek rövid áttekintése a 9. táblázatban található. Ezek között csupán a távolságbecslések között található lényeges eltérés, amelyek az RR Lyrae csillagok és a szín-fényesség-diagramon alapulnak. Az eltérés valószínűsíthető oka az RR Lyrae csillagokon alapuló eljárásra vezethető vissza, mivel az abszolút fényesség és a fémtartalom közti összefüggés még nem tisztázott minden részletében. A lehetséges $M_V/[Fe/H]$ korrelációkra vonatkozó elméletek között számos nemlineáris kalibráció is található, lásd például az 5. fejezetet Sandage & Tamman (2006) művében.

9. táblázat. A számított és az eddig publikált paraméterek összevetése.

Referencia	[Fe/H]	Távolság [kpc]	Kor [10^9 év]
<i>Jelen munka:</i>			
RR Lyrae	-1,16	7,9	–
VI CMD	-1,5	9,2	11
JK CMD	-1,36	8,3	–
<i>Egyéb munkák:</i>			
RS05	-1,22	–	9,1
MG04	-1,16	–	–
DA05	-1,33	9,3	8,4
SK00	-1,33	–	–
FW93	-1,03	9	13
ZW84	-1,27	–	–
HR96	-1,16	8,5	–

RS05 - Rakos & Schombert (2005)

MG04 - Mackey & Gilmore (2004)

DA05 - De Angeli és mktsai (2005)

SK00 - Shetrone & Keane (2000)

FW93 - Fischer és mktsai (1993)

ZW84 - Zinn & West (1984)

HR96 - Harris (1996)

3.9. Megjegyzések az egyedi csillagokhoz

Ebben az alfejezetben a detektált egyes változócsillagokra vonatkozóan adok meg további információkat.

V1:. A Sharpee és mksai (2002, ezentúl S02) által megadott periódus 1,16736 nap, viszont az ő fázisdiagramjuk meglehetősen nagy szórást mutat. Mivel a mi adataink sokkal simább fázisgörbét adnak, a 3. táblázatban megadott periódus értéket tekintjük valósnak (0,52835 nap).

V4:. Az ISIS által detektált kis amplitúdójú változásokat csupán egyetlen éjszaka sikerült megfigyelni.

V5:. Ennek a cefeida változónak az esetében egy különleges „dudor” figyelhető meg a fénygörbe leszálló ágán. Ezt a jelenséget sajnos csak egyetlen egy éjszaka sikerült detektálni, lehetséges oka még instrumentális effektus.

V7: . Spektroszkópiai méréseinken alapulva az átlagos radiális sebessége ennek a csillagnak 210 km s^{-1} .

V8:. A periódus S02 munkájában 0,57382 nap, de a fénygörbékük meglehetősen zajos. Teljes fázisbeli lefedettség mellett a mi értékünk (0,29218 nap) tűnik helyesnek.

V10:. Nagy amplitúdójú, folytonos változás a fluxusgörbe leszálló ágán, ami RR Lyrae típusú csillagra jellemző.

V11:. Méréseink megerősítik S02 klasszifikációját és periódusát.

V12:. Csupán egyetlen éjszaka mérési adata állt rendelkezésünkre, a csillag messze található a halmaztól és 4 magnitúdóval halványabb mint a halmaz horizontális ága. Az objektum valószínűleg a Kis Magellán-felhőben található.

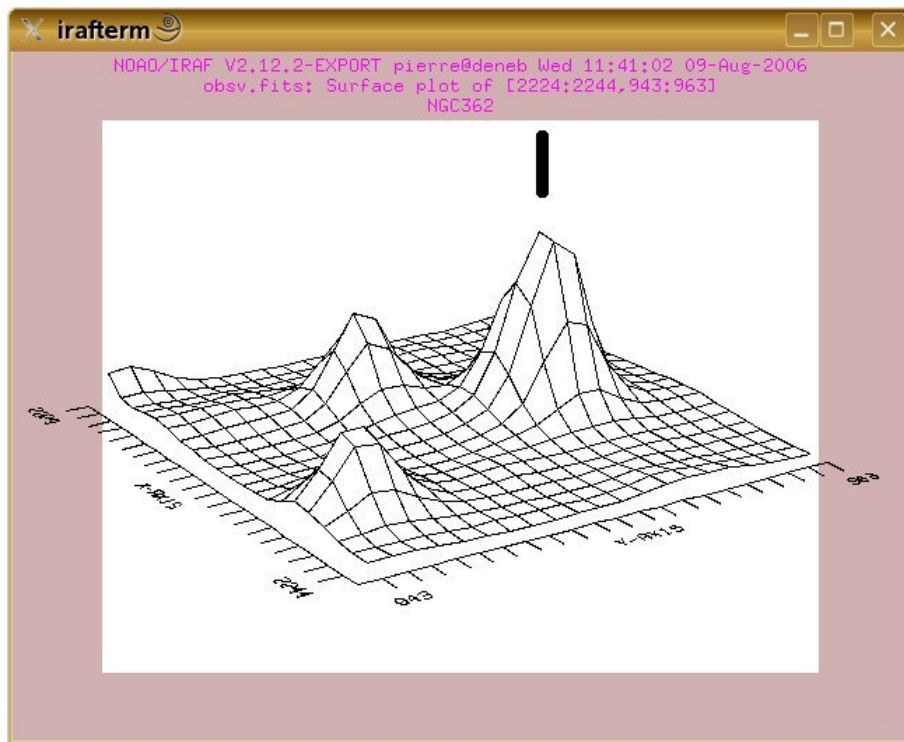
V14:. Méréseink megerősítik S02 klasszifikációját és periódusát.

V17:. A csillag a halmaz vörös óriáságában helyezkedik el. A fázisba rendezett fluxusgörbe 69 napos periódust valószínűsít.

V19:. Ez a csillag a Kis Magellán-felhő vörös óriáságának a tetején található, valószínűleg egy hosszú periódusú vörös változó. Az objektum megtalálható a széncsillagok Morgan & Hatzidimitriou (1995) által összeállított katalógusában.

V21:. Méréseink megerősítik S02 klasszifikációját és periódusát.

V23:. Clement (2002) katalogizálta az objektumot mint alaplómodusban pulzáló cefeidát 4,20519 napos periódussal. Ez hiba, amit az elgévelt tizedesvessző okozott, mivel a csillag RR Lyrae típusú változó 0,420234 napos periódussal, ami tized akkora. A csillag átlagos radiális sebessége 230 km s^{-1} .



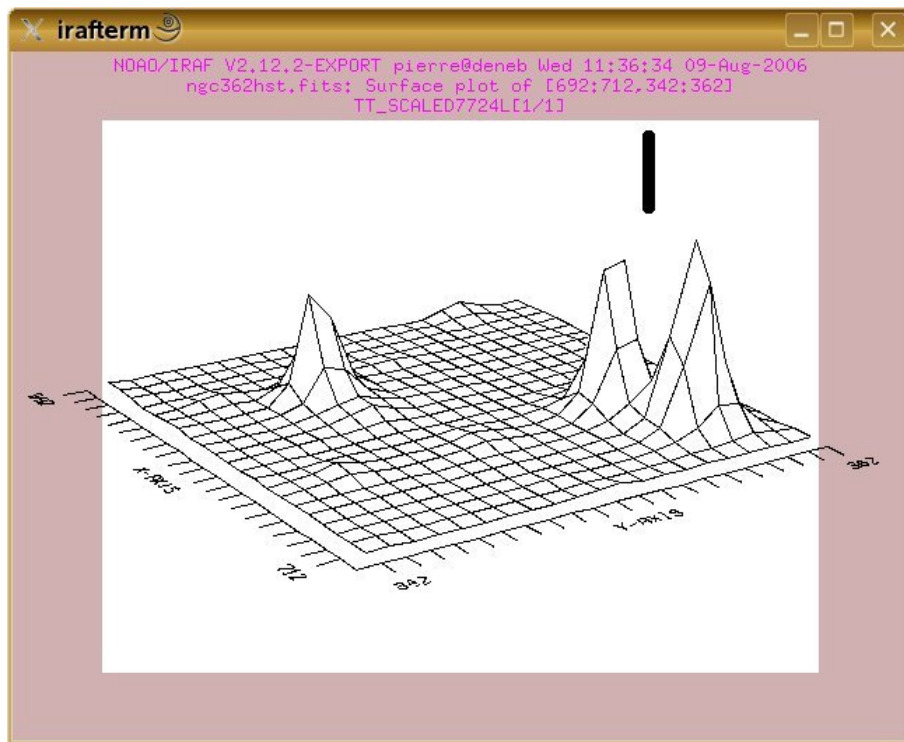
31. ábra. A V31 egyik legjobb saját felvételünk feldolgozásakor

V31.: A csillag RR Lyr-szerű fényváltozásokat mutatott, amit éjszakáról éjszakára erős moduláció torzított. Mind a fénygörbe extrémumai, mind az amplitúdó rövid időskálán változott, ezért a pulzációs paraméterek meghatározására irányuló erőfeszítéseink hasztalanok maradtak. Két különböző éjszakán felvett fénygörbék a 8. és 9. ábrákon láthatóak. A Hubble Űrtávcső archívumában lévő egyik felvétel ellenőrzésekor a csillagot egy nagyon szoros összeolvadó csillagpárnak találtuk. A 31. ábrán látható a legjobb seeingű éjszakán készült képünk, amin a két csillag profilja teljesen összeolvadt, míg a 32. ábrán látható HST felvételen a két csillag jól szeparált. A párt alkotó csillagok közti szeparáció mindössze 159 mas és látszólag hasonló fényességgel rendelkeznek. Ezért arra következtettünk, hogy mindkét komponens RR Lyrae csillag és az egyedi fénygörbéjük szuperpozíciója okozta a periódus-meghatározás kivitelezhetetlenségét. Látóirányú szögbeli szeparációjuk a halmaz távolságában 1200 Csillagászati Egységnek felel meg, ezért lehetséges, hogy a két objektum fizikailag is összetartozik.

V36.: A csillag megtalálható Cayrel de Strobel és mksai (2001), F, G, K csillagokra vonatkozó $[Fe/H]$ értékek katalógusában $[Fe/H]=-1,33$ értékkel, ami jó egyezésben van a halmazra kapott fémességgel.

V38.: Az objektum a horizontális ágon található, az egy éjszakányi ISIS adat a fluxusgörbe emelkedő ágát mutatta.

V41.: A csillag a halmaz horizontális ágán található, a fényváltozás amplitúdója meghaladja a 0,5 magnitúdót.



32. ábra. A V31 a HST egyik archív felvételén

V47.: Az objektum megtalálható a galaktikus gömbhalmazok katalógusában (Monella, 1985) a következő paraméterekkel: $[Fe/H]=-1,39$, $v_{rad}=221 \text{ km s}^{-1}$, amelyek tisztán mutatják a halmaztagságot. A fénygörbe Algol típusú fedési kettősökre jellemző, amelyre a maximumban kis amplitúdójú pulzációra utaló változások rakódnak. Sajnos a csillag a halmaz nagyon zsúfolt centrumában található, ennek következtében a fénygörbe gyakran elég zajos.

V48.: Az egy éjszakányi ISIS-fénygörbe nagy amplitúdójú szinuszos fényváltozást mutat. Az objektum a halmaz centrumában található és feltehetőleg RRc típusú változó.

V50.: A fázisba rendezett ISIS adatsor erős fénygörbeváltozást mutat, de a halmaz központjára jellemző zsúfoltság ez esetben is problémát jelentett a fotometria során.

V51.: Samus és mktsai (2004) 135 napos periódust ad meg.

V60.: Méréseink megerősítik Sawyer (1931) eredményeit.

V61.: Ez az objektum a halmaz vörös óriás ágának tetején található, feltehetőleg hosszú periódusú vörös változócsillag.

V62.: A csillag a horizontális ágon található, ami azt sugallja, hogy RR Lyr típusú változó. A rövid időtartamú fluxusgörbe a felszálló ágat mutatja.

V63.: Annak ellenére, hogy a csillag a jelek szerint a horizontális ágon található, fénygörbéje mégis δ Sct típusú változócsillagra jellemző.

V74.: A csillag átlagos radiális sebessége 230 km s^{-1} .

V75.: Az objektum képe a CCD szegmensek közötti hézagra esett a standard transzformációt célzó megfigyelések során, emiatt nem állnak rendelkezésre V és $V - I$ értékek a 6. táblázatban. Fénygörbénk alátámasztja S02 klasszifikációját és periódusát.

V82.: Ez a változócsillag W UMa típusú és érdekes változásokat mutatott a fénygörbe átlagszintjében. Az adatfeldolgozás során semmilyen forrását nem találtuk szisztematikus hibának, így ez a viselkedés valóságosnak tűnik (lásd Walter, 1983 cikkét a Kwee-effektus kapcsán).

A 3. fejezetben ismertetett eredményeket a Székely és mksai, 2005, 2006, 2007a publikációkban közöltem le.

4. Gömbhalmazok multiobjektum-spektroszkópiai vizsgálata

4.1. Bevezetés

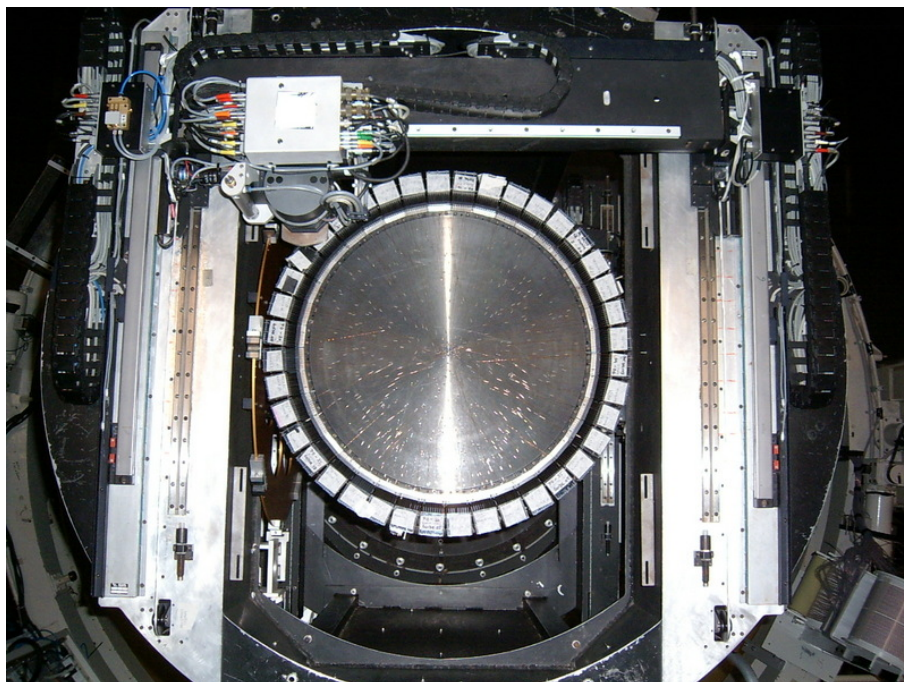
A gömbhalmazok a Tejútrendszerünkben lévő legidősebb objektumok közé tartoznak és csillagaik egyedülálló módon adnak betekintést a kozmikus időskálán zajló galaxis fejlődésbe. Ezek a halmazok a Tejútrendszer gravitációs potenciáljának érzékeny indikátorai, mivel a külső régiókban lévő csillagok radiális sebesség-eloszlását befolyásolja a Tejútrendszer környező gravitációs tere. Jelenlegi tudásunk szerint a gömbhalmazok jelentős dinamikai fejlődésen mentek keresztül. Ennek részei voltak olyan folyamatok is, amelyek a csillagok „elpárolgásáért” felelősek (Meylan & Heggie 1997): árapályszerű kölcsönhatások a galaxissal és a kéttest-relaxáció. Legtöbb esetben a halmaz nagymértékben elnyújtott pályán kering a galaxis centruma körül. A perigalaktikus pont közelében lépnek fel a legerősebb gravitációs hatások, amelyek eredménye az árapály-nyúlványok kialakulását előidéző árapály-lökés.

A legutóbbi vizsgálatok hosszú árapály-nyúlványokat találtak két, alacsony koncentrációjú halmazban (Palomar 5, illetve NGC 5466), megerősítve ezzel az elméleti jóslatokat (Odenkirchen és mksai 2001; Grillmair & Johnson 2006). A cikkekben publikált eredmények sikerének zálogai a felhasznált nagy határfényességű égboltfelmérések, ezek közül a legkiemelkedőbb az SDSS⁴. Az említett égboltfelmérések statisztikai analízissel teszi lehetővé a halmaztagság meghatározását, amihez a csillagok színét és fényességét használják föl. A halmazhoz tartozás kérdésének eldöntésére egy másik lehetőséget az egyedi csillagok spektroszkópiai megfigyelései nyújtanak a fényesség és a radiális sebesség meghatározásával, melyek fontos támpontok a halmaztagság eldöntésében.

A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsovön nemrégiben üzembe helyezett AAOmega multiobjektum-spektrográf kiváló lehetőségeket kínál 350-360 radiális sebesség mérésére egyetlen expozícióval. A nagy látómező (2 fok) lehetővé teszi olyan csillagok megfigyelését is, melyek az árapály-sugár többszörösére helyezkednek el a halmaztól. A műszerről készült egyik felvételt a 33. ábrán tanulmányozhatjuk. Az $1-2 \text{ km s}^{-1}$ sebességmérési pontossággal könnyedén beazonosíthatóak a halmaztól elszökött csillagok, amelyek azonos vagy nagyon hasonló radiális sebességűek, mint maga a gazda-halmaz.

Értekezésem ezen fejezetében bemutatom a halmaztag csillagok radiális sebességének analízisét a megfigyelt 5 halmazban tapasztalt rendszerszintű forgás tekintetében. Az eddig elért eredményeket két szakcikkben (Kiss, Székely, Bedding és mksai, 2007 és Székely és mksai, 2007b), valamint két konferenciakiadványban közzétük.

⁴Sloan Digital Sky Survey, www.sdss.org



33. ábra. Az AAOmega konfigurálás alatt lévő pozícionáló lemeze felülnézetben. Az x - y síkban mozgó pozícionáló robot a kör alakú lemez pereméről húzza be a csillag fényét kivezető száloptikát, az annak végén lévő parányi prizmát pedig néhány mikron pontossággal rögzíti a kívánt helyzetben. Két független felület (Plate 0 és Plate 1) létezik a hatalmas, henger alakú műszer két végén, amíg az egyiket konfigurálja a robot, a másik a fókusz felé néz, így azzal zavartalanul lehet méréseket végezni. A teljes látómező konfigurálása a 400 száloptikával körülbelül másfél órát vesz igénybe (saját felvétel).

10. táblázat. A halmaztagként azonosított csillagok teljes száma, a halmaz radiális sebessége Harris (1996) katalógusából és a mért átlagos sebesség.

Halmaz	Csillagok száma	v_{rad} (H96) km s ⁻¹	$\langle v_{\text{rad}} \rangle$ km s ⁻¹
47 Tuc (NGC 104)	911	-18,7	-16,1
M12 (NGC 6218)	158	-42,2	-40,4
M30 (NGC 7099)	129	-181,9	-178,1
M55 (NGC 6809)	433	174,8	171,7
NGC 288	123	-46,6	-43,5

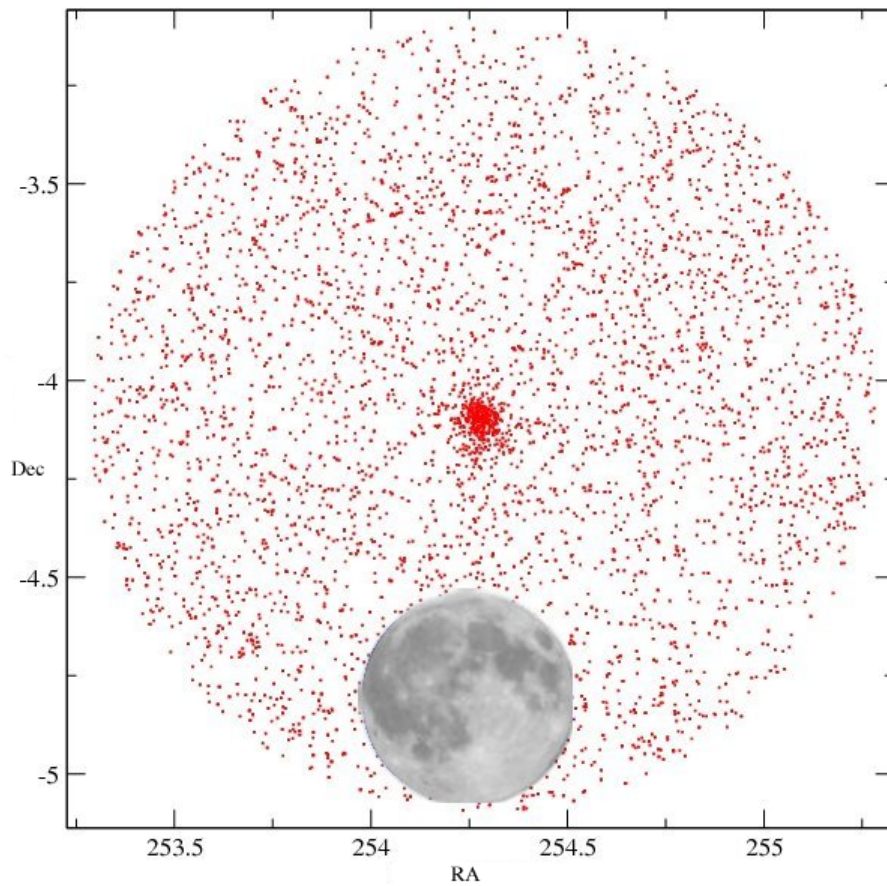
4.2. A megfigyelések és az adatfeldolgozás

A célpontokat Harris (1996) gömbhalmaz katalógusából választottuk, különös tekintettel a következőkban felsorolt kritériumokra: előnyben részesítettük a közeli, vörösödés nélküli halmazokat, amelyek nagy látóirányú sebességgel rendelkeznek a főként korongbeli csillagokat tartalmazó környező galaktikus mezőhöz képest. Ez utóbbi nagyon hasznos a halmaztag csillagok megkülönböztetéséhez. A célobjektumok kiválasztásánál emellett szintén figyelembe vettük az árapály-nyúlványok kutatása terén közölt legújabb eredményeket (az NGC 288 esetében; Leon és mksai 2000), az érdekes dinamikai történetet (M12; de Marchi és mksai 2006), illetve a belső szerkezetet (47 Tuc; Meylan & Mayor 1986). Végül a következő öt halmazra esett a választásunk: 47 Tuc, NGC 288, M12, M30 és M55. Ezen felül véletlenül rögzítettük a Kis Magellán-felhőhöz tartozó extragalaktikus gömbhalmaz, az NGC 121 néhány csillagának spektrumát is.

Megfigyeléseinket 2006 augusztusában végeztük 7 éjszakán. A megfigyelési időszakban a seeing stabilan a 1,2 és 2,2 ívmásodperces értékek között maradt és mindössze fél éjszakás kiesés volt az összefüggő felhőzet okozta takartság miatt. Összességében több mint 10500 csillag spektrumát rögzítettük a D1700 jelű rácsot használva. Ennek segítségével a közeli infravörös tartományban lévő ionizált kalcium triplett vonalai körül tudtunk spektrumokat felvenni. A detektált hullámhossztartomány 8350 Å és 8790 Å között volt, a felbontóképesség értéke $\lambda/\Delta\lambda = 10\,500^5$. Minden halmazra vonatkozóan több különböző látómezőt exponáltunk (magára a halmazra centrálva), konfigurációként 300-350 csillag fényét rögzítve. Annak érdekében, hogy a jel/zaj viszony elérje az 50 és 250 közötti értéket, 60-tól 90 percig terjedő össz-expozíciós időt alkalmaztunk. Az égi háttérfényesség mérésére és a vezetésre konfigurációként 30-40 szálóptikát használtunk fel.

Az észlelni kívánt csillagokat a 2MASS infravörös égboltfelmérés pontforrás katalógusából (Skrutskie és mksai, 2006) választottuk. Első lépésként minden halmaz vörös óriáságára illesztettünk egy egyenest és kiválasztottuk azokat a csillagokat, amelyek szín-

⁵A vörös oldali spektrumok mellett felvettünk minden csillagról kék oldali színeképeket is, az ezekre vonatkozó paraméterek: 580V jelű rács, 3700 Å és 5800 Å közötti hullámhossz tartomány, $\lambda/\Delta\lambda = 1300$ felbontóképesség.

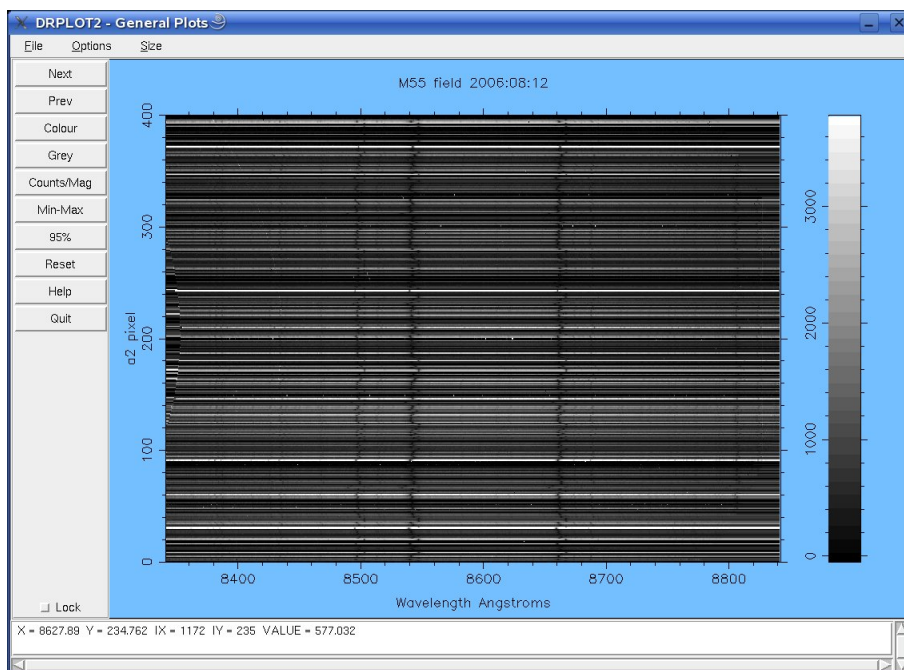


34. ábra. Az AAOmega által lefedett látómező az M10 halmazra. Alul a Hold méretarányos képe érzékelteti az egy expozícióval rögzített látómező hatalmas méretét.

ben és fényességben megegyeztek vele. Az M12 és a 47 Tuc esetében a vörös óriáság alsó részéből szelektáltunk. Az M30 és az NGC 288 körüli szegényes csillagpopuláció miatt nem szűrtük meg a csillagokat, hanem a teljes látómezőt használtuk. A célcillagok teljes fényességtartománya a K sávban 7 magnitúdó volt (8 és 15 magnitúdó között), de egy konfigurációban limitáltuk ezt a fényesség tartományt 3 magnitúdóra, hogy elkerüljük a szórt fény miatti áthallást (*cross-talk*) a száloptikák között. Az így kapott látómező szimulált látványát a 34. ábrán láthatjuk.

A megfigyelés során kapott nyers spektrumok redukálása a standard 2dF adatfeldolgozó csomaggal (*drcontrol*) történt, amely automatikusan előállítja a hullámhosszkalibrált spektrumokat. A feldolgozás egyik lépéséről a 35. ábrán láthatunk pillanatfelvételt. A kontinuum normálás az IRAF *onedspec.continuum* taszkjával történt. Ezután saját fejlesztésű programmal megtisztítottuk a spektrumokat a legerősebb földi légköri emissziós vonalak maradványaitól, ehhez a környező kontinuumot használtuk fel lineáris interpoláció segítségével.

A spektrumok további analíziséhez két paramétert határoztunk meg minden csillagra vonatkozóan: a radiális sebességet és a Ca II triplét vonalainak teljes ekvivalens szélességét ($\Sigma EW = W_{8498} + W_{8542} + W_{8662}$). Ez utóbbi meghatározása Lorentz- és Gauss-



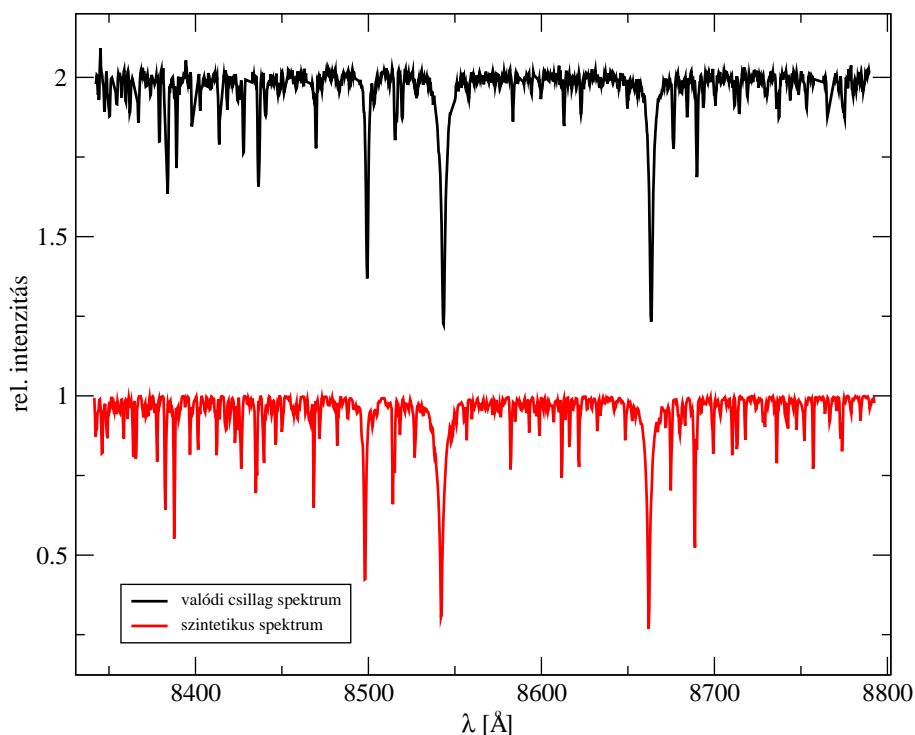
35. ábra. Az adatok feldolgozása közben a redukáló program által felkínált nézet. Itt az egymás mellett lévő 400 spektrum mintegy „felülnézetből” látszik, jól kivehetők a különböző radiális sebességek miatt eltérő módon eltolódott Ca triplett vonalak (a 3 sötét sáv).

profilok összegének a vonalprofilra történő illesztésével zajlott (Cole és mksai 2004). A radiális sebességek kiszámítása iteratív módon történt. Egy kezdeti sebességbecslést a vonalprofil illesztés adott, amelyet felhasználtunk a legjobban illeszkedő spektrum megtalálásához Munari és mksai (2005) kiterjedt színekép-adatbázisából. Egy példát a spektrum illesztésre és az illesztés jószágára a 36. ábrán láthatunk. Az illesztett paraméterek: T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, v_{rot} . Az illesztett modellspektrumot kereszt-korreláltuk az eredetivel, így kaptuk a véglegesen elfogadott sebességet. A becült sebességmérési pontosság $\pm 1\text{-}2 \text{ km s}^{-1}$ körüli érték.

4.3. Részletes eredmények

A halmazhoz tartozó csillagok azonosítására azok következő tulajdonságait használtuk: radiális sebesség, ekvivalens szélességek és a K fényesség. A végső kiválasztás alapjai a $v_{\text{rad}} - \Sigma EW$ és a $\Sigma EW - K$ fényesség összefüggések voltak. Ezek alapján az 5 halmazban 123-911 csillagot tudtunk azonosítani halmaztagként (lásd a 10. táblázatot). Vegyük észre, hogy ezek a minták erősebb megszorítások után születtek, mint amelyek Kiss és mksai (2007) munkájában szerepelnek, ahol csupán a látóirányú sebesség szerepelt halmaztagságra utaló fizikai paraméterként.

Ezután ábrázoltuk a halmaztagok heliocentrikus radiális sebességeit a illető halmaz középpontjától mért távolság függvényében (37. ábra). Ezen a vízszintes vonalak rep-

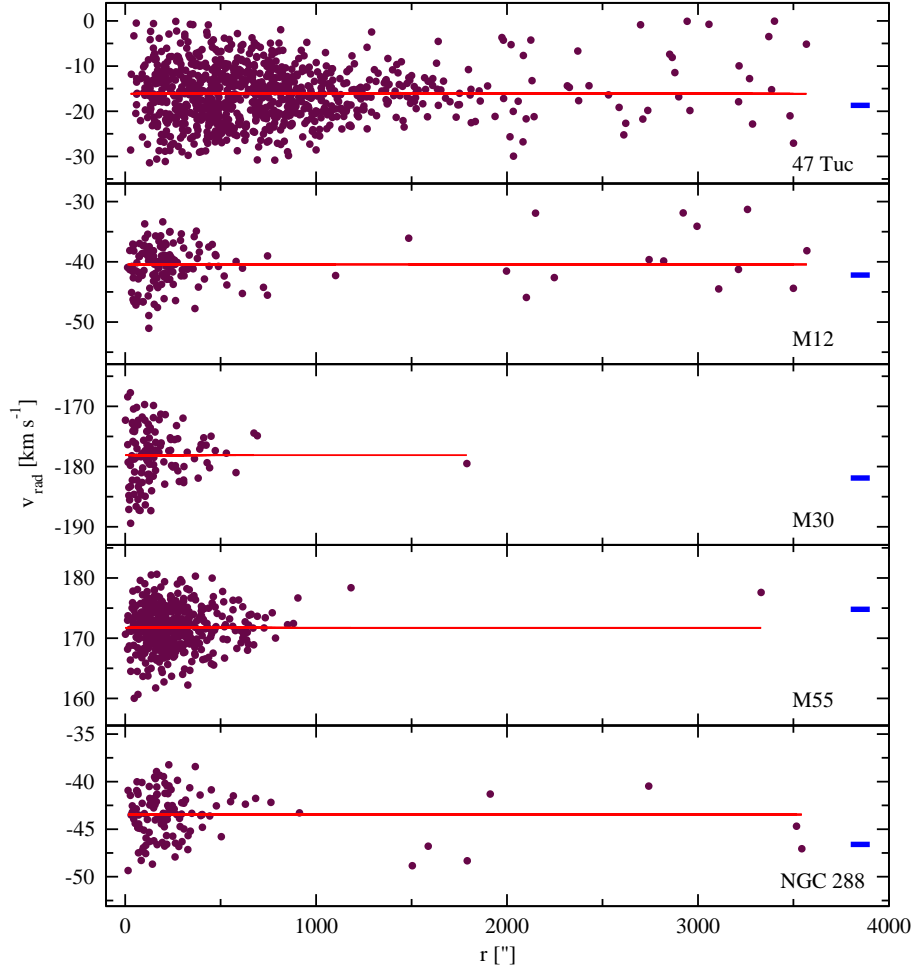


36. ábra. Egy csillag és a hozzá illesztett szintetikus spektrum összevetése.

reprezentálják a halmaz átlagsebességét, míg az ábra jobb oldalán látható vastag vonalak jelölik Harris (1996) katalógusából származó értékeket. Feltűnő, hogy míg az általunk mért átlag és a katalógusbeli értékek között esetenként 3 km s^{-1} körüli különbség is mutatkozik, a mi mintánk - a 47 Tuc kivételével - sokkal kiterjedtebb, mint az azt megelőző felmérések. Ez részben magyarázhatja a megfigyelt különbségeket. A kiváló statisztika miatt a 37. ábrán domináns jellemvonás a karakterisztikus ék formájú sebességeloszlás, amelyet felhasználhatunk a sebesség-diszperziós profil meghatározásához, ami érzékeny jelzője a dinamikai tulajdonságoknak.

A 38. ábrán ábrázoltuk a 47 Tuc és M55 csillagainak égi pozícióit, a látóirányú sebességek nagyságát pedig színskálával kódoltuk. Az ábrára pillantva szembeötlő a mindkét halmaz esetében megfigyelhető jól definiált aszimmetrikus eloszlás, amit a forgás következményeként lehet interpretálni.

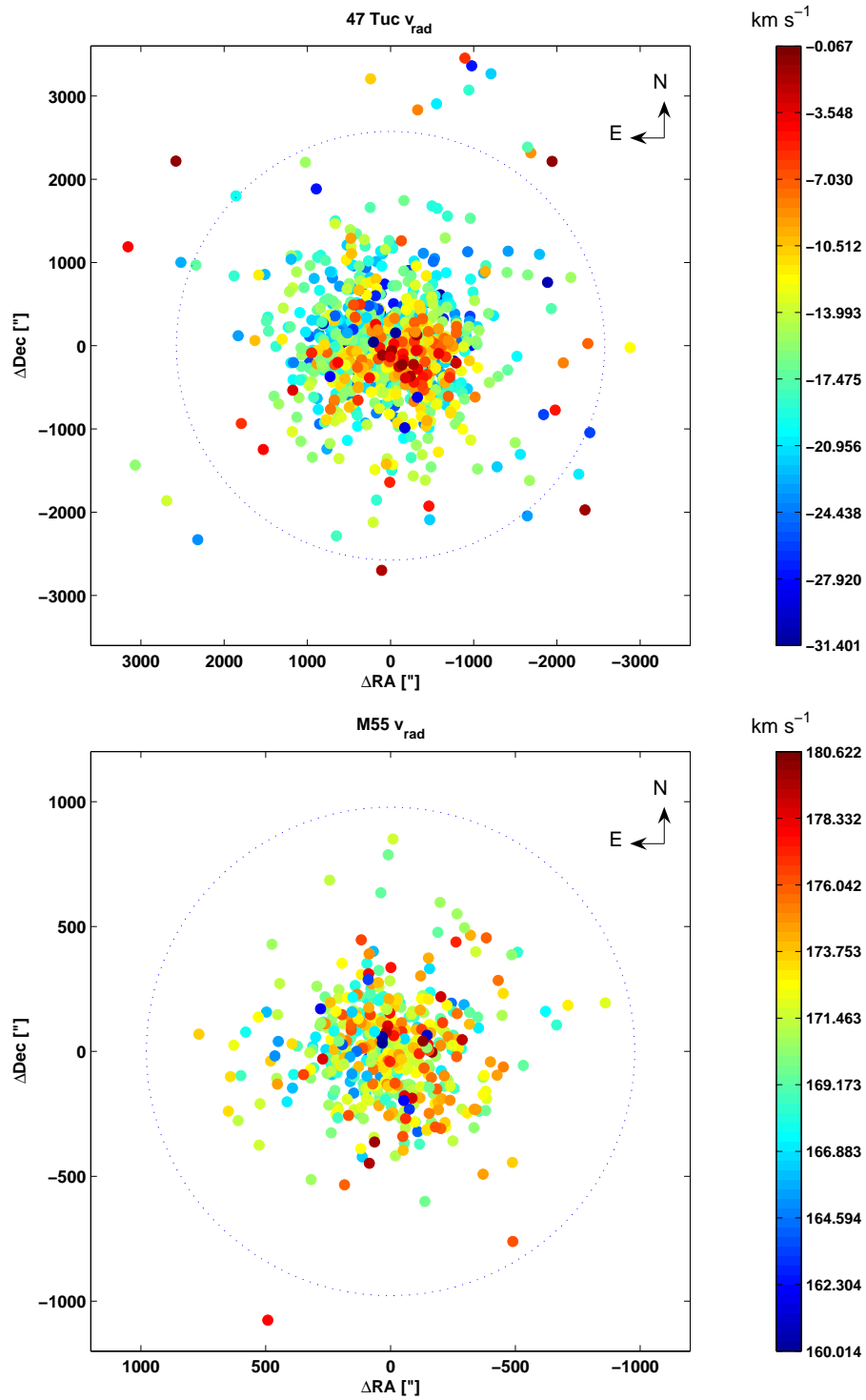
Annak érdekében, hogy e két halmaz esetében a rendszerszintű forgás kvantitatív paramétereit meghatározhassuk, feltűntettük az átlagos radiális sebességeket a pozíciószög függvényében. Az eredményül kapott grafikon a 39. ábrán látható. A belső sebesség-diszperzió hatásait úgy igyekeztük minimalizálni, hogy pozíciószögbeli 15 fokos széles szektorokban átlagoltuk a sebességeket ($\alpha=0^\circ$ megfelel északnak, míg 90° keletnek). A 10. táblázatban feltüntetett átlagsebességeket kivontuk az ábra jobb tanulmányozhatóságának érdekében. Az eloszlások szinuszos függvény alakú alakja jól kivehető mindkét esetben, bár a 47 Tuc esetén sokkal egyértelműbb. A maradék három halmaz adatai nem mutattak ilyen nyilvánvaló mintázatot.



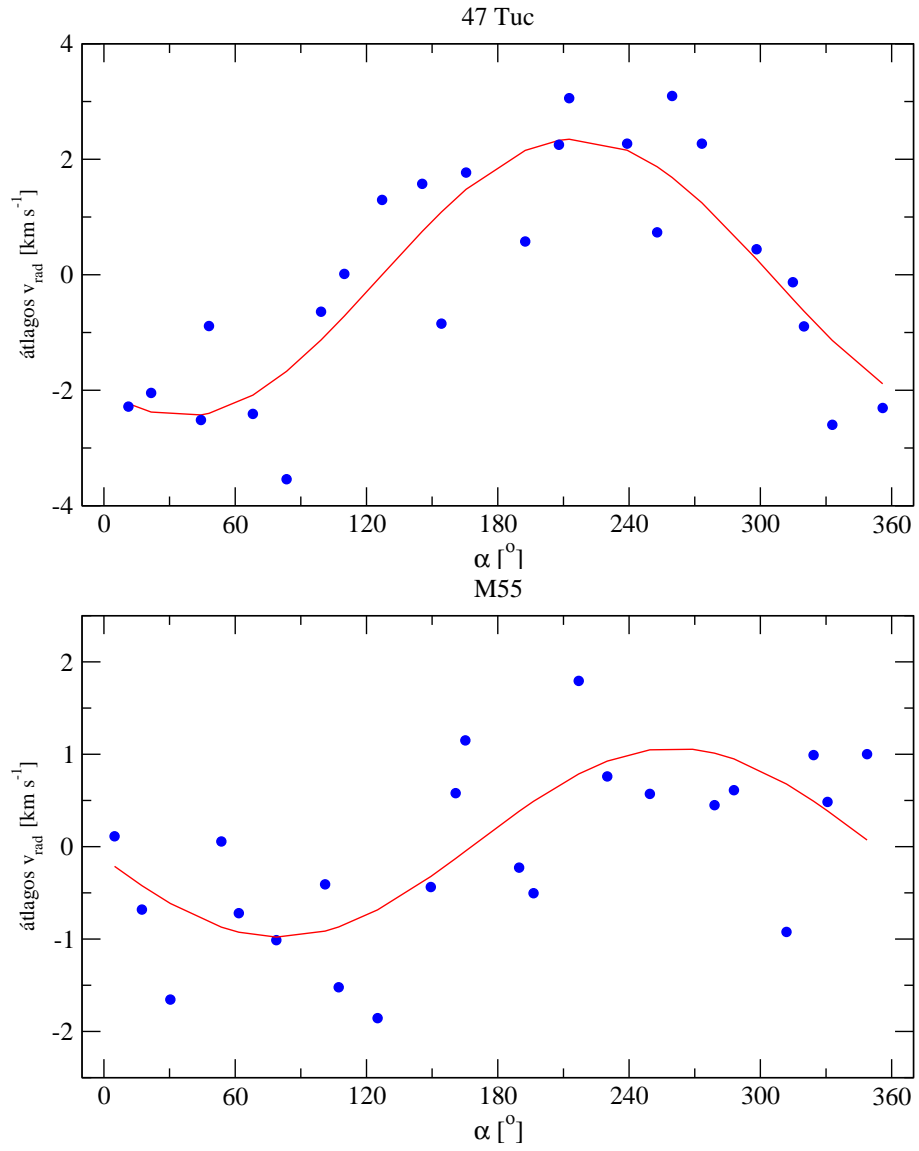
37. ábra. A halmazcsillagok látóirányú sebessége a halmaz középpontjától mért távolság függvényében. A vízszintes vonalak jelölik az átlagos halmazsebességet. A vastag vonalak (jobb szélén) Harris (1996) katalógusából származó értékeket mutatják. A sebességek széles eloszlásának oka az átlagértékek körül részben a halmaztag csillagok belső sebességszórása.

11. táblázat. A detektált rendszerszintű forgás paraméterei: A csúctól csúsig mért sebességamplitúdó, míg a forgástengely pozíciószögét ekvatoriális és galaktikus koordináta-rendszerben is megadtuk.

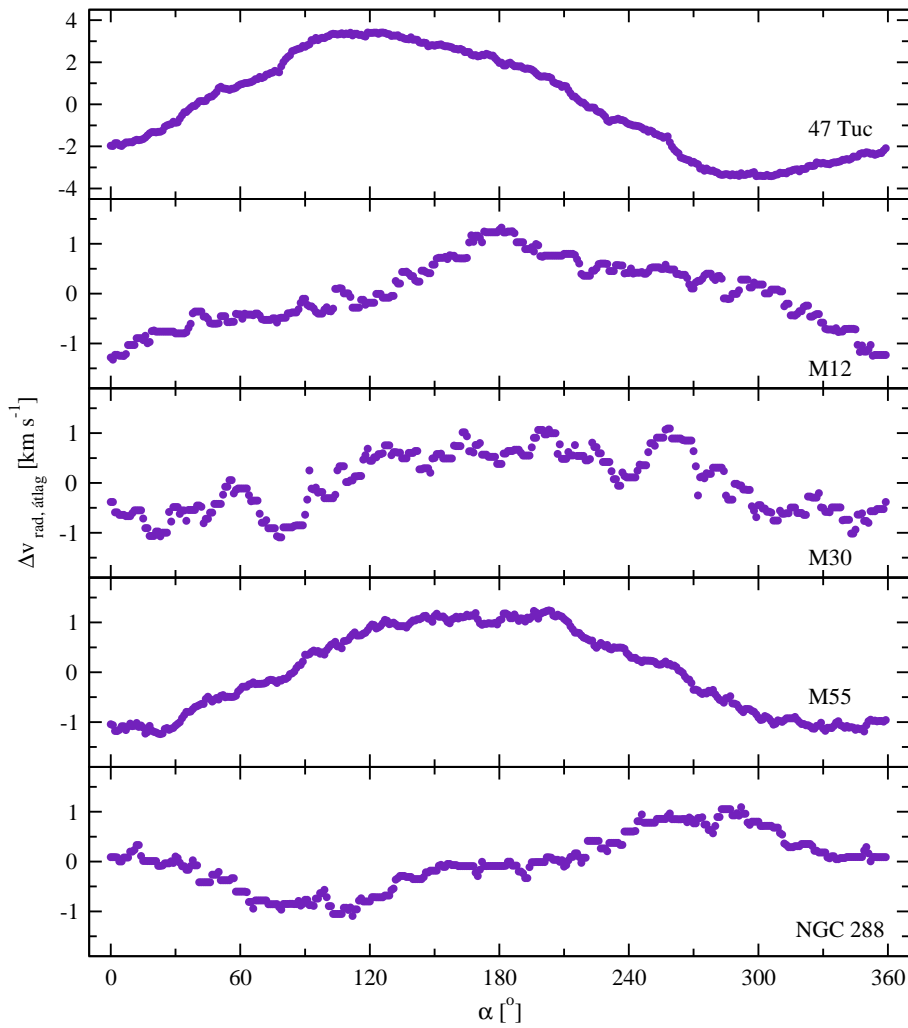
Halmaz	A km s^{-1}	PA (ekv.) $^{\circ}$	PA (gal.) $^{\circ}$
47 Tuc	$6,6 \pm 0,07$	$130/310 \pm 5$	$122/302 \pm 5$
M12	—	—	—
M30	$1,5 \pm 0,3$	$16/196 \pm 15$	$90/270 \pm 15$
M55	$2,4 \pm 0,1$	$170/350 \pm 7$	$61/241 \pm 7$
NGC 288	$1,4 \pm 0,15$	$97/277 \pm 10$	$52/232 \pm 10$



38. ábra. *Felső panel:* csillagpozíciók a 47 Tuc halmazban, a radiális sebességek különböző színekkel kódoltak. A kör az árapálysugarat jelöli ($r_t = 42.9'$). *Alsó panel:* hasonló ábra az M55 esetében ($r_t = 16.3'$). Ebben az esetben kisebb az alkalmazott látómező.



39. ábra. Átlagos radiális sebességek a polárszög függvényében. A polárszög teljes tartományát 24 darab azimutális, egyenlő szélességű tartományra osztottuk fel. Ezen kívül feltüntettük a legjobban illeszkedő szinusz függvényt is.



40. ábra. Az átlagos radiális sebességek a halmazokon fokenként keresztülléptetett képzeletbeli tengely mindkét oldalán. (Érdemes figyelni a 47 Tuc y tengelyén lévő különböző skálára.)

Egy másik hasznos módszer a radiális sebességek azimutális függésének kimutatására egy képzeletbeli tengely körbeforgatása kis szögekkel (például 1 fokkal) a halmaz közepére illesztve, kiszámítva a különbségeket az átlagos vagy medián radiális sebességek között ezen képzeletbeli tengely mindkét oldalán (például Côté és mksai, 1995). Az eredményül kapott görbéket a 40. ábrán mutatom be. Erre alapozva felső korlátot tehetünk a látóirányra vetített forgási sebességekre mindegyik halmaz esetében a görbék amplitúdóját figyelembe véve. Például a 47 Tuc esetében a forgási sebesség $6,6 \text{ km s}^{-1}$, tökéletes egyezésben Meylan & Mayor (1986), illetve Anderson & King (2003) eredményeivel, ugyanakkor jelentősen nagyobb minta alapján pontosabb eredményként. A többi halmazra vonatkozó forgássebesség-bebecslések a 11. táblázat második oszlopában találhatóak. Az M12 esetében az eredményül kapott görbe egyértelműen nem szinusz függvény alakú, ezért nem próbáltuk meg illeszteni és forgásként értelmezni az adatokat.

Az égbolt síkjára vetített forgástengely irányának meghatározásához egy szinusz függ-

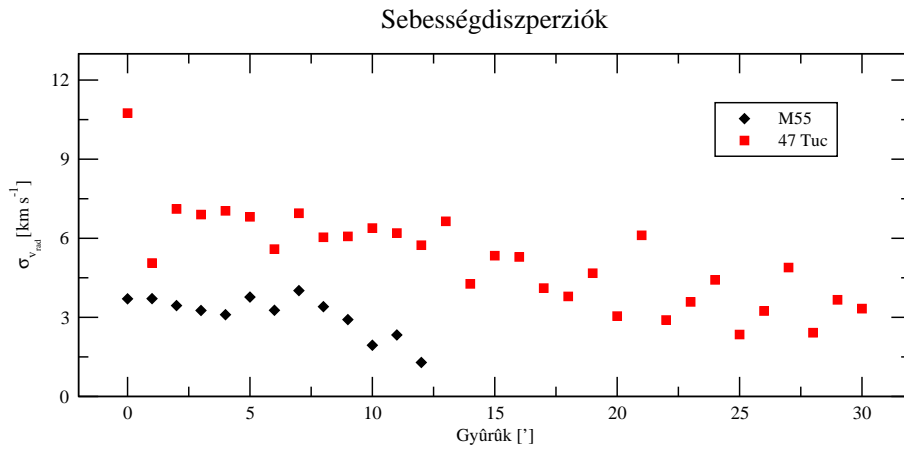
vényt illesztettünk a 40. ábrán bemutatott görbékre. Az eredményt a 11. táblázatban közöljük. Ezenkívül átváltottuk az ekvatoriális pozíciószögeket galaktikus koordinátákra annak érdekében, hogy az irányok eloszlásában esetleg meglévő mintázatra fény derüljön. Ténylegesen a rendszerszintű forgás négy biztos detektálásakor olyan irányokat találtunk, amelyek közel párhuzamosan ($\pm 20\text{--}25$ fokon belül) helyezkednek el a galaktikus fősíkhoz képest, ami esetlegesen a forgási tengelyek egy nem véletlenszerű eloszlásának jele lehet, bár a használt minta mérete túl kicsi a statisztikus megközelítéshez. Mindenesetre megerősítettük a 47 Tuc esetében a forgás jelenlétét és felfedeztük azt az M30, M55 és az NGC 288 jelű halmazokra vonatkozóan. Az M12 esetében tovább kell tisztítani a mintát a galaktikus mező csillagaitól származó szennyeződéstől mielőtt újra megkíséreljük az esetleges forgás detektálását.

4.4. Jövőbeli tervek

Az eddig felvett adataink az információk egyedi forrásának számítanak a tanulmányozott 5 halmazra vonatkozóan. A közeljövőben az elkülönítésre (a halmaztagok és a galaktikus mező csillagai között) a fizikai tulajdonságok teljes paraméterterében (radiális sebesség, fémesség, effektív hőmérséklet, felszíni gravitáció) lévő csomósodások detektálását fogjuk használni. A globális kinematikai paraméterekre, a tömeg-luminozitás arányaira és a halmaz csillagkeletkezési történetére vonatkozóan erősebb megszorítások tehetők a halmaztagok megtisztított mintájának felhasználásával. Különösen érdekes lehet a korfémesség összefüggés, mivel a fémességbeli széles tartomány utalhat egy időben elhúzódozó (akár 2-4 milliárd év) csillagkeletkezési szakaszra (Stanford és mksai 2006).

Rendkívül érdekes annak vizsgálata, hogy milyen mechanizmusok befolyásolhatják a gömbhalmazbeli sebességeloszlásokat, különös tekintettel az árapály-nyúlványokra. A tesztelendő elméletek közé tartozik az „elpárolgott” csillagok árapály-fűtése a külső gravitációs mező által (Drukier és mksai 1998), a halmazok körüli sötét anyagból álló halo jelenléte (Carraro & Lia 2000) és a newtoni dinamika gyenge gyorsulási térben történő esetleges érvényvesztése (Scarpa és mksai 2007). Ez utóbbi különösen érdekes, mivel a módosított newtoni dinamika - ami $a_0 \sim 1,2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$ alatti gyorsulásokig érvényes - esetleg alternatívát kínálhat a sötét anyaggal szemben, aminek meglehetősen messzeható és beláthatatlan következményei lehetnek a modern kozmológiai problémákra.

Mindegyik halmaz esetében célunk megmérni a csillagok sebességszperziós profilját, ami határozott csökkenést és ellaposodást mutat a halmaz centrumától távolodva (Scarpa és mksai 2007). A 47 Tuc és az M55 esetében az eddig rendelkezésre álló minta alapján készült sebességszperziós grafikon a 41. ábrán látható. A gömbhalmazok a jelentős populáció ellenére viszonylag egyszerű csillagrendszerek, amelyben minden csillag mozgását a többi halmaztag által kifejtett newtoni gravitációs vonzás határozza meg. Ámbár minden eltérés a dinamika klasszikus törvényeitől (például a Módosított New-



41. ábra. A radiális sebességek diszperziója a halmaz centrumától mért 1 ívperc széles koncentrikus gyűrűkben kiszámítva a 47 Tuc és az M55 esetében. Látható a csökkenés a középponttól távolodva, amely jelenségre pl. Scarpa és mktsai (2007) is utalnak.

toni Dinamika, Modified Newtonian Dynamics: MOND, eredetileg Milgrom 1983-ban vezette be) azt jósolja, hogy az ellaposodásnak mindig az azonos abszolút gyorsulásnál kellene előfordulnia, függetlenül a halmaz galaktikus környezetétől. Ezért a halmazok dinamikai tulajdonságait úgy definiálhatjuk, mint a newtoni gravitáció fundamentális próbáját. Mivel a halmaz forgása az interpretáció szisztematikus hibáját okozhatja, ki kell vonni a simított sebességmezőt az adatokból. A reziduálok meg fogják mutatni, hogy vajon a sebességdiszperzió lecsökken-e nagy sugaraknál és visszafordul-e növekedésbe az árapálysugáron kívül. A newtoni dinamika esetleges érvényvesztése és a konvencionális dinamikai effektusok szétválasztásának érdekében különböző paraméterű halmazokat szükséges megfigyelnünk, például eltérő galaktocentrikus távolságok esetén és meg kell határozni azt az aktuális gyorsulást, amelynél a diszperziós profil ellaposodik. A dolgozatomban bemutatott minta tekinthető úgy, mint egy kiindulási pont ebbe az irányba és még sok erőfeszítést kell tenni a halmazdinamika jobb elméleti modellezésének érdekében. Emellett tervezzük a megfigyelési adatbázis kiterjesztését további halmazokkal (NGC 6752, NGC 362), illetve a meglévő halmazok mintáinak elmélyítésével, új csillagok vizsgálatával. A most bemutatott megfigyelések mellett 2007-ben is sikerült távcső-időt nyernünk az AAT/AAOmega konfigurációra, amely jelentősen kibővítette a radiális sebességek adatbázisát.

4.5. Összefoglalás

A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsövön a közelmúltban üzembe helyezett AAOmega multiobjektum-spektrográffal közepes felbontású közeli infravörös spektrumokat vettünk fel 10500 csillagra 5 déli égbolton található gömbhalmazban és azok környezetében. A kiválasztott gömbhalmazok a következők voltak: 47 Tuc, M12, M30, M55 és NGC 288. A radiális sebesség-mérés pontossága kereszt-korrelációs módszerrel $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ körüli,

emellett szintetikus modellspektrumok illesztésével minden csillagra megbecsültük a fényességet, az effektív hőmérsékletet, a felszíni gravitációt és a forgási sebességet. A sebességtérképek és a halmaztag csillagokra vonatkozó sebességdiszperziók analízise felfedte négy halmaz esetében a rendszer forgását.

5. Változócsillagok megfigyelései

5.1. Bevezetés

A csillagok számos okból kifolyólag és eltérő úton-módon változtathatják fényességüket. Alapvetően az emberi időskálán lezajló folyamatok lehetnek céljai csillagászati megfigyeléseknek. Megkülönböztethetünk fizikai és geometriai változókat (idegen kifejezéssel „intrinsic” és „extrinsic” változócsillagokat). Az előbbi csoportba magának a csillagnak valamilyen speciális tulajdonsága játszik szerepet a fényváltozás létrejöttében (például pulzáló, eruptív, foltos, katalizmikus csillagok), míg az utóbbi osztályhoz azok az égitestek tartoznak, amelyek mintegy „külső” hatás eredményeképpen mutatnak változást (például fedési kettősök, árapály-erők által torzított csillagok, gravitációs lencsehatás). A fényváltozás időtartamát tekintve megkülönböztethetünk epizódikus, irreguláris vagy szabálytalan, félszabályos és szabályos/periodikus csoportokat.

A változócsillagok asztrofizikai jelentőségét illetően két fontos megközelítést érdemes kiemelni. Elméleti szempontból a változás okának kutatása fontos, míg a megfigyelési oldalról a fényváltozás elemzéséből meghatározható tulajdonságok (például méret, távolság, belső szerkezet) tartanak számot érdeklődésre. A csillagászatban a távolságok mérése gyakran valamilyen *standard gyertyán* alapul, amelyek tulajdonságai a nagy luminozítás és könnyű azonosíthatóság. Ezen objektumtípus esetén a luminozítás szorosan korrelál valamilyen könnyen megfigyelhető paraméterrel. Például a cefeidák egyedi luminozításai körülbelül 100-as faktorral eltérnek, de a periódussal korrigálhatóak. A jóval szűkebb luminozítás tartománnyal rendelkező RR Lyrae csillagok esetében is megfigyelhető a periódus–fényesség–reláció, szupernóváknál pedig a fénygörbealakkal függ össze a luminozítás. A csillagok kis amplitúdójú, több frekvenciás oszcillációnak tanulmányozása - jelentős elméleti háttérrel - az égitestek belső szerkezetének feltárásához járult hozzá jelentős mértékben (asztroszeizmológia).

5.2. A GW UMa nagy amplitúdójú δ Scuti vizsgálata

5.2.1. Bevezetés

A GW UMa itt bemutatott mérései az elsők azóta, hogy a Hipparcos asztrometriai műhold adataiból fény derült a csillag fényváltozására, a csillag újabb vizsgálatait Hintz és mksai (2005) végezték. A GW UMa a pulzáló változócsillagok nagy amplitúdójú δ Scuti csoportjába tartozik (az angol terminológia alapján High-amplitude δ Scuti star, HADS). Ezek az objektumok a fősorozathoz közeli I-es populációs vagy elfejlődött II-es populációs csillagok lehetnek, ez utóbbiakat SX Phe változók néven is ismeri a szakirodalom, a fényváltozás oka radiális pulzáció (Rodríguez és mksai 1996) rövid periódussal és viszonylag nagy amplitúdóval ($0,^d05$ és $0,^d15$ között, illetve $A_V \geq 0,^m30$, ez utóbbi széles

12. táblázat. A csillag főbb paraméterei, a magnitúdó tartomány és a periódus a GCVS-ből származnak.

Név	populáció	V_{\max}	V_{\min}	periódus (nap)	Szűrők
GW UMa	II?	9, ^m 48	9, ^m 97	0.20319 ^a	BV I_C

^a ESA (1997)

körben elfogadott egyezmény). Ezek a tulajdonságok teszik ezeket a csillagokat vonzó célpontokká kis és közepes méretű távcsövek számára. A mérések célja lehet evolúciós hatások kimutatása, illetve a feltételezett kettős nagy amplitúdójú δ Scuti csillagok fizikai paramétereinek pontosítása a kettősség segítségével (például Derekas és mksai, 2003a és 2009).

5.2.2. Megfigyelések

Megfigyeléseinket a Szegedi Csillagvizsgáló 0,4 méteres Cassegrain-távcsövével végeztük, amelyen egy SBIG ST-9E CCD kamera szolgált detektorként (512×512 darab, $20\mu\text{m}$ -es pixelek, a látómező $6' \times 6'$). A CCD mérések redukálása standard IRAF rutinokkal történt, beleértve a flat-field korrekciót, amihez az esti és/vagy reggeli szürkületben vetünk fel sky-flat képeket. A differenciális fényességek kiszámításához gyors apertúra fotometriát használtunk (*qphot* és *phot* rutinok) két vagy több közeli, hasonló fényességű összehasonlító csillagot kimérve. A kis látómezőben található kevés csillag miatt nem próbálkoztunk PSF fotometriával. Az időjárási körülményektől valamint a változó és az összehasonlító csillagok közti fényesség különbségtől függően a fotometriai pontosság $\pm 0,^m01 - 0,^m02$ körül mozgott. A maximum időpontok meghatározását alacsonyrendű (3-5) polinomoknak a fénygörbékre történő illesztésével végeztük. Az eljárás pontossága körülbelül $\pm 0,^d0003$ (vagyis ± 26 másodperc), ami az alkalmazott expozíciós idővel vetethető össze.

5.2.3. Eredmények

A GW UMa fényváltozását a Hipparcos asztrometriai műhold által szolgáltatott fotometriai adatok vizsgálata fedte fel ($\langle V \rangle \approx 9,7$, $A_V = 0,^m44$, $P = 0,^d2032$). A viszonylagos fényesség és a rövid periódus ellenére a felfedezés óta nem történtek újabb megfigyelések. A csillag érdekességét a periódus értéke adja: ez éppen a nagy amplitúdójú δ Scuti csillagok és a legrövidebb periódusú RR Lyrae csillagok megfelelő paraméterének határán található (Poretti 2001). A Poretti (2001) által használt fénygörbe-diagnosztikai diagramon való elhelyezéshez B , V és I_C szűrőkben figyeltük meg a csillagot 6 éjszaka során 2002-ben (Poretti I-szűrős adatokat használt több száz HADS és RRc változócsillag vizsgálata során a karakterisztikus Fourier-paraméterek meghatározása érdekében). Több mint 2500 egyedi adatpontot rögzítettünk, a teljes megfigyelési statisztika a 13. táblázat-

13. táblázat. Megfigyelési adatok és új maximum időpontok a GW UMa esetére

Dátum	szűrő	adatpontok száma	HJD_{\max}
2002.04.30	V	820	2452395,5408
2002.05.01	V	180	2452396,5584
2002.05.02	I_C	674	2452397,3702 2452397,5782
2002.05.03	V	229	2452398,3850:
2002.05.03	I_C	258	2452398,3877
2002.05.22	B	181	2452417,4858
2002.05.31	B	204	2452426,4259

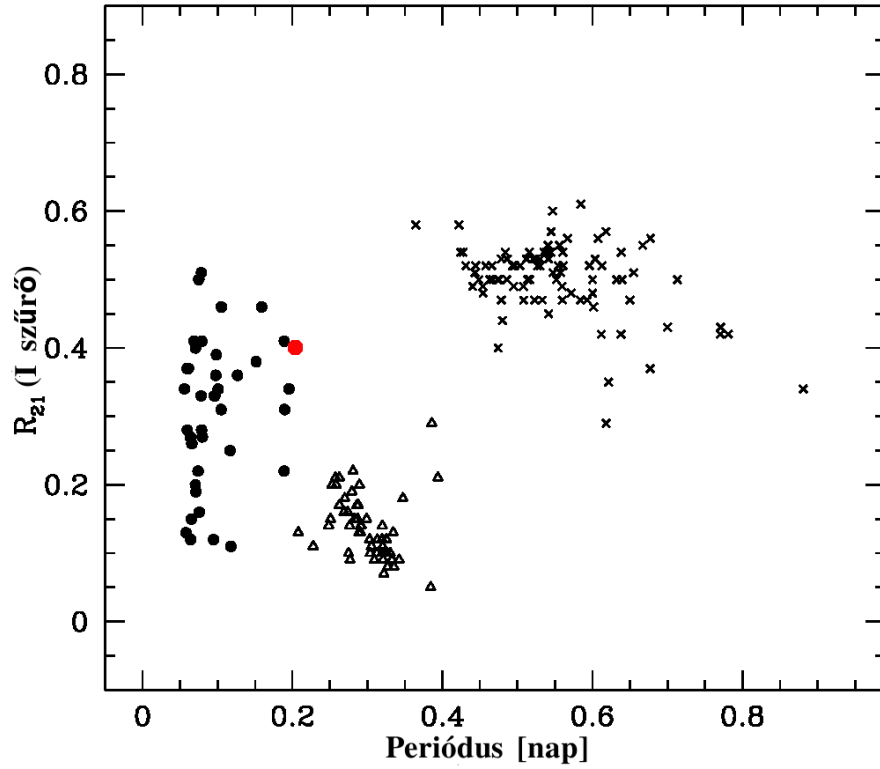
ban tekinthető meg. Az összehasonlító csillag a GSC 3011-2535 volt ($V \approx 10^m$).

Analízisünk megmutatta, hogy a csillag nagy valószínűséggel monoperiodikus, mivel nem detektáltuk egyik fotometriai sávban sem a fénygörbe alakjának ciklusról ciklusra történő megváltozását (ámbar ez a konklúzió meglehetősen rövid időtartamot felölelő méréseken alapul). A fázisba rendezett fénygörbék a 43. ábrán láthatóak. Az instrumentális BVI_C rendszerben megfigyelt amplitúdók a következők: 0^m62 , 0^m44 , illetve 0^m27 . A jobb időfelbontás érdekében a mérések egy éjszaka kivételével egy szűrővel történtek, az eljárás hátránya azonban a standard transzformáció hiánya. A Fourier amplitúdó-paraméter $R_{21}=0,40$ az I -szűrős adatokra a HADS objektumok közé helyezi a csillagot (lásd Poretti, 2001 7. ábráját, illetve 42. ábra). Ezért kizárhatjuk az első vagy második felhangú RR Lyrae pulzáció lehetőségét. 8 új maximum időpontot határoztunk meg (13. táblázat) és az átlagos O–C érték a Hipparcos efemeridáival ($E_0 = 2448500,1160$, $P = 0^d2031940 - 0^d0062$ (körülbelül -9 perc), ami alapján vagy a Hipparcos periódusa nem elegendően pontos vagy egy enyhe periódusváltozás történt az utolsó évtizedben. Konstans periódust feltételezve kiszámítottuk a következő korrigált efemeridákat:

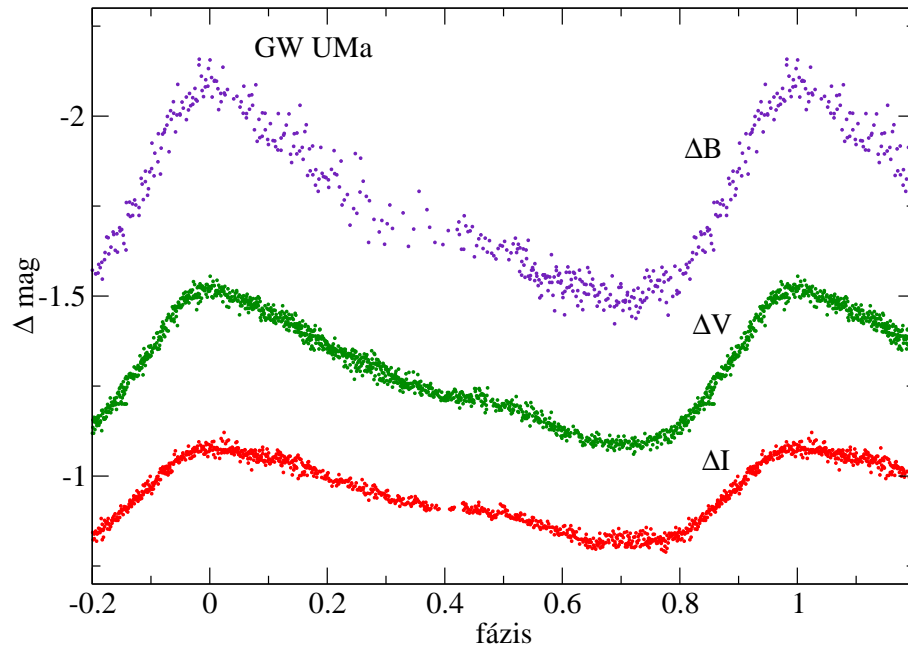
$$HJD_{\max} = 2448500,1160 + 0,20319367(3) \times E$$

Mindenesetre további CCD megfigyelések szükségesek a helyzet tisztázásának érdekében. A csillag feltehetőleg II. populációs objektum, mivel a magas galaktikus szélesség ($+59^\circ14$) nagy radiális sebességgel párosul (a SIMBAD adatbázis értéke -81 km s^{-1}). Sajnos a Hipparcos parallaxis adata ($0,58 \pm 2,88 \text{ mas}$) nem használható, így további következtetéseket nem vonhatunk le a jelenleg rendelkezésre álló adatokból.

Hintz és munkatársai (2005) a csillagot stabil, monoperiodikus, nagy amplitúdójú δ Scuti csillagnak találták $0^d20319389$ periódussal. Eredményeik szerint a csillag fémtartalma a Napéhoz közeli érték, forgási sebessége $15 \pm 5 \text{ kms}^{-1}$.



42. ábra. A GW UMa elhelyezve Poretti (2001) 7. ábráján. A nagy amplitúdójú δ Scuti csillagokat fekete kör, az RRC csillagokat háromszög, az RRab csillagokat keresztek jelzik, a GW UMa helyzetét piros kör jelöli.



43. ábra. A GW UMa HADS fázisgörbéi. ($E_0=2452395,5408$, $P = 0,^d2031940$)

5.3. Az SZ Her fedési kettőscsillag analízise

5.3.1. Bevezetés

A δ Scuti típusú pulzáló csillagok egyik legfrissebb katalógusában (Rodríguez és mksai, 2000) 86 objektum tartozik kettős vagy többszörös rendszerek közé. Ezek közül csak 9 csillag tagja fedési kettős rendszereknek (Rodríguez & Breger, 2001). A legutóbbi felmérések számos új fedési kettőst találtak pulzáló komponenssel (például Kim és mksai, 2003). Soydugan és mksai (2006) cikke már 25 ismert és 197 potenciális jelöltet sorol fel a pulzáló komponenssel rendelkező fedési kettősök közül. 2007-ben pedig felfedezték az első nagy amplitúdójú δ Scuti társat tartalmazó fedési kettőst (Christiansen és mksai, 2007).

A fedési kettős rendszerekbeli δ Scuti típusú pulzáló komponensek az asztroszeizmológia kívánatos célpontjai, mivel segítségükkel lehetőség nyílik a pulzációs módusok azonosítására az alapvető fizikai paraméterek meghatározásán keresztül. Egy másik érdekes lehetőség az árapályhatások tanulmányozása az oszcillációkra (Willems & Aerts, 2002). Ezen jelentőségektől inspirálva elkezdtünk egy fotometriai felmérést az Algol típusú fedési kettősök pulzáló komponenseinek felderítése érdekében. (RW CrB és AY Cam, Derekas és mksai, 2003b; illetve AI Dra, Kiss, L. L., 2002). Mivel a δ Scuti csillagok fősorozati vagy enyhén elfejlődött A–F típusú csillagok az instabilitási sáv alsó részén, célpontjainkat a komponensek spektráltípusa alapján válogattuk. Az alapvető paramétereket elsődlegesen a Hipparcos adatbázisból merítettük (ESA, 1997).

Értekezésem ezen fejezetében bemutatom az SZ Herculisra vonatkozó eredményeket. A csillag főbb paraméterei a következők:

$V=9^{\text{m}}92$, $\Delta V=1^{\text{m}}75$, $\alpha(2000)=17^{\text{h}}39^{\text{m}}36^{\text{s}}8$, $\delta(2000)=32^{\circ}56'46''7$, spektráltípus: A0, a másodkomponens spektráltípusa: G2 vagy G8–G9, átlag spektrum: F0V.

A csillag fényváltozásának nyomon követése meglehetősen korán elkezdődött (Dugan, 1923), az első vizuális minimum időpont meghatározása 1902-re datálódik. Giuricin & Mardirossian (1981) fénygörbe-analízisének megfelelően a rendszer félig érintkező (semi-detached), a Roche-üreget kitöltő szubóriás másodkomponens csillaggal. Periodikus O–C változásokat szintén megfigyeltek (Mallama 1980, Zavala 2002), ámbar legjobb tudomásunk szerint mindeztidáig nem áll rendelkezésre részletes periódusváltozásra vonatkozó tanulmány.

5.3.2. Megfigyelések és adatfeldolgozás

2002. június–júliusban 9 éjszaka során végeztünk standard Johnson–Cousins *VRI* szűrős CCD megfigyeléseket. A jó időfelbontás elérése érdekében az adott éjszakán csak egy szűrővel dolgoztunk. Az elért fotometriai pontosság 0,01–0,07 mag között volt az időjárási körülményektől függően. Az adatok döntő többségét a Szegedi Csillagvizsgáló 0,4 méteres Cassegrain-távcsövével vettük fel, ami Szeged város külső részén található meg-

14. táblázat. Az SZ Her minimum időpontjai

HJD _{min}	Szűrő	Típus	O–C (nap)
2452446,3795(2)	<i>V</i>	fő	0,00341
2452450,4706(2)	<i>V</i>	fő	0,00403
2452461,5152(10)	<i>R</i>	mellék	0,00434
2452464,3777(3)	<i>R</i>	fő	0,00351
2452466,4207(3)	<i>I</i>	mellék	0,00127
2452477,4705(1)	<i>I</i>	fő	0,00677

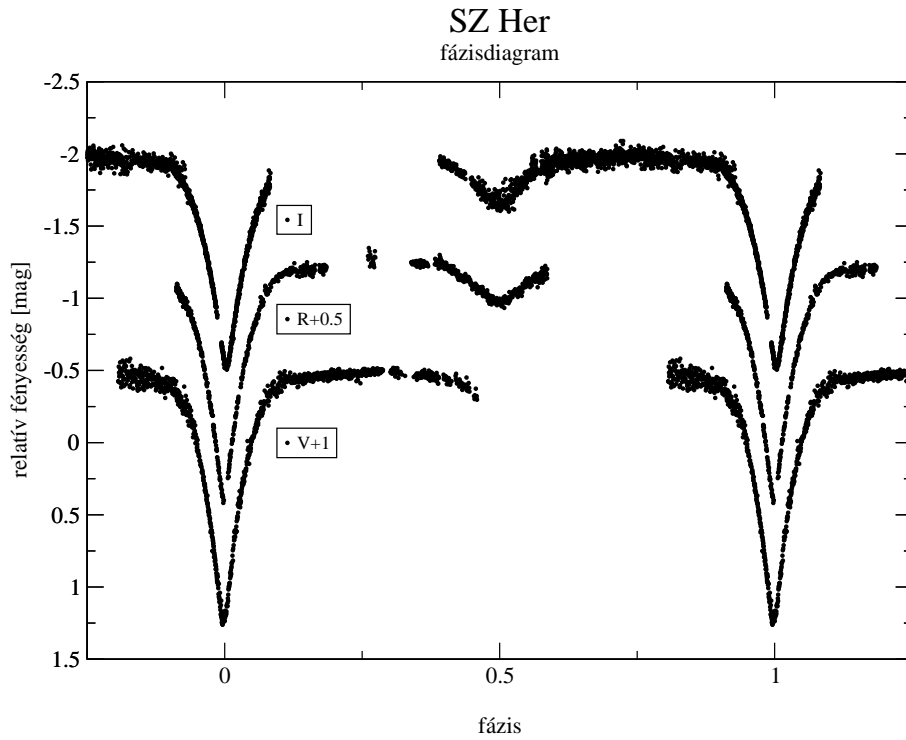
lehetősen erős fényszennyezés mellett. A távcsövet egy hűtött SBIG ST–9E CCD kamerával használtuk (512×512 darab, 20 μ m méretű, 2×2 binnelt pixelek, a látómező 6' × 6' volt). Az alkalmazott expozíciós idő 30 másodperc volt. Egy éjszakányi adatot a Konkoly Obszervatórium 60/90/180 cm-es Schmidt-távcsövével rögzítettünk, amelyen egy Photometrics AT200 CCD kamera (1536×1024 KAF 1600 MCII bevonatú CCD chip) szolgált detektorként. A leképzett terület 29'×18' volt, ami 1,1"/pixel-es képskálának felel meg. A kamera működési hőmérséklete –40 °C alatt volt. Mivel csupán néhány másodpercnyi expozíciós időt alkalmaztunk - tipikusan 5 s - lehetőségünk nyílt viszonylag gyors fotometria végzésére, így az eredményül kapott fénygörbe több mint 1600 adatpontot tartalmaz. A komplett adatbázis 3 *V*-szűrős, 2 *R*-szűrős és 4 *I*-szűrős fénygörbét tartalmaz 5481 egyedi adatponttal, melyek 54,6 órát fednek le. Ezek a fotometriai adatok megtalálhatóak az IBVS (Information Bulletin on Variable Stars) honlapján⁶.

A differenciális fotometriához közeli csillagokat választottunk összehasonlító és ellenőrző csillagnak: GSC 2610–1214 ($V=11,^m82$) és a GSC 2610–1417 ($V=13,^m11$). Hat új epochát tudtunk meghatározni a minimumok esetében (négy főminimum és két mellékminimum) a fénygörbék meghatározott részeire történő alacsonyrendű polinomok illesztésével. Ezeket a meghatározott minimumokat a 14. táblázatban tüntetem fel. Az adatok fázisba történő feltekerése a következő efemeridával történt: $HJD_{\min} = 2452446,3795 + 0,8180644E$. A fázisba rendezett instrumentális fénygörbék a 44. ábrán láthatóak. A fénygörbére a mély fedések jellemzőek ($\Delta V=1,^m75$, $\Delta R=1,^m62$, $\Delta I=1,^m5$) és látható egy csekély mértékű reflexiós effektus is (körülbelül $0,^m1$).

5.3.3. Eredmények

Első pillantásra a fénygörbék nem mutatnak jól kivehető rövid periódusú oszcillációt egyik komponens esetében sem. A rövid időskálájú fényváltozások hiányát határozottabban megerősítendő elvégeztük az egyedi fénygörbék frekvencia analízisét. Ennek érdekében az eredeti adatokból kivontuk a fedésből eredő átlagos fényváltozást. A reziduális adat mutatja az átlagtól való eltérést.

⁶<http://www.konkoly.hu/cgi-bin/IBVS?5467>

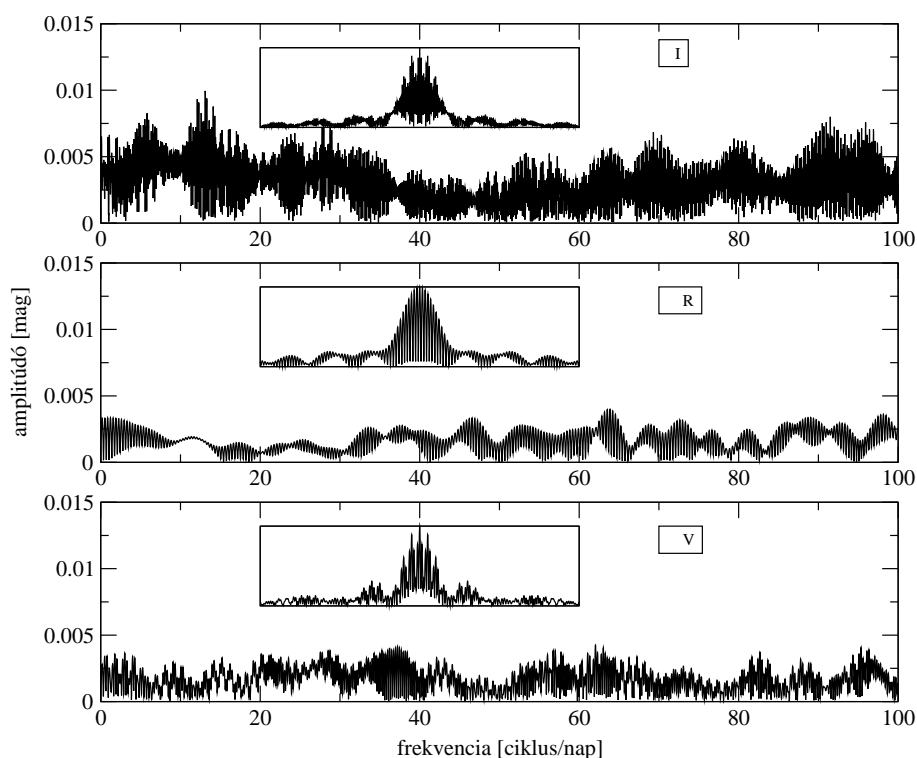


44. ábra. Az SZ Her *VRI* fázisgörbéi. A görbék függőlegesen eltoltam a jobb láthatóság érdekében.

Az analízishez a Sperl (1998) által kifejlesztett *Period98* programot használtuk. Az eredményül kapott Fourier-spektrumot az ablakfüggvényekkel együtt a 45. ábrán láthatjuk. A vizsgálat eredményeit a következőkben foglalhatjuk össze. A reziduális fénygörbékben nem tudtunk azonosítani semmilyen koherens oszcilláció okozta karakterisztikus frekvenciát nagyobb amplitúdónál mint $0,^m004$ *V* és *R* szűrőben, illetve $0,^m007$ az *I* szűrő esetében. Ezért bizonyosan kijelenthetjük, hogy nincs olyan δ Scuti-típusú pulzátor az SZ Her rendszerében, amely nagyobb pulzációs amplitúdókkal rendelkezne mint ezek a felső korlátok.

Mindezek mellett leellenőriztük a csillag legutóbbi időkben mutatott periódus változását. A korábbi O–C adatok megvizsgálásával (Kreiner, 2001)⁷ következtetni tudtunk az SZ Her egy esetleges harmadik komponensének a léteire. Az O–C diagram szinuszos alakot mutat $0,^d015$ amplitúdóval és hozzávetőleg 66 éves periódussal, amint az a 46. ábrán is látható. A torzulás egy lehetséges interpretációja a fény-idő effektus, amit a kettős rendszernek egy harmadik komponens körüli keringése okozhat. Feltételezve, hogy a keringési sík normálisa merőleges a látóirányunkra és az excentricitás nulla (vagyis $i=90^\circ$, $e=0$), Kepler III. törvényét alkalmazva megbecsülhetjük a harmadik komponens tömegfüggvényét (Zhou & Fu, 1998): $(\Delta t c)^3 / P_{\text{orb}}^2 = f(M_{3\text{min}})$, ahol Δt az O–C diagram fél-amplitúdója, c a fénysebesség és P_{orb} a feltételezett keringési periódus, azaz 66 év. A fent megadott paraméterekkel a következő eredményt kapjuk: $f(M_{3\text{min}}) = 0,004 M_\odot$. Ennek

⁷Elektronikusan elérhető: <http://www.as.wsp.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?SZ%20her>

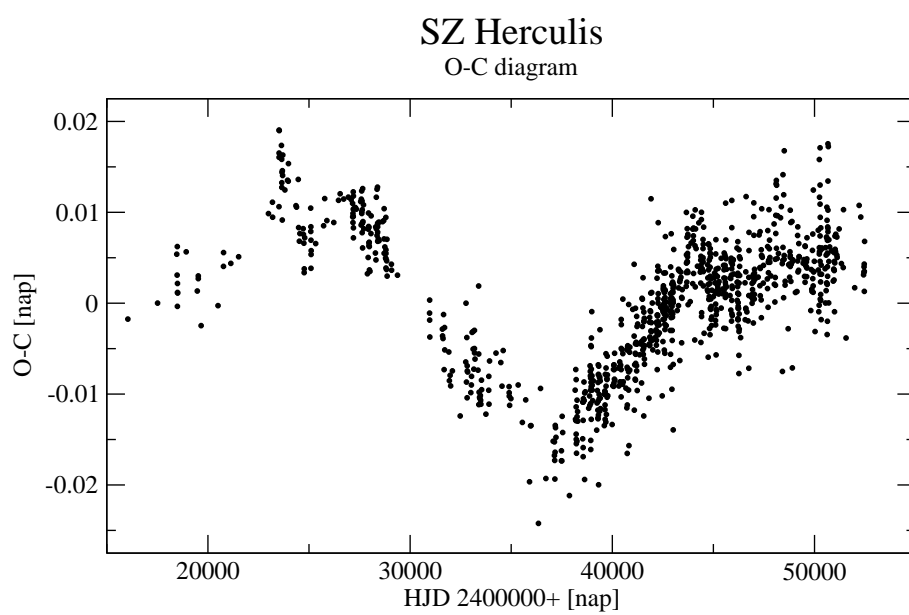


45. ábra. A reziduális fénygörbék frekvenciaspektruma. A kis inzertek az ablakfüggvényt mutatják.

megfelelően az egyik lehetőség az, hogy a kísérő objektum óriásbolygó lehet hozzávetőleg 4 jupitertömegnyi minimális tömeggel.

5.3.4. Összefoglalás

Dolgozatom ezen részében az Algol típusú SZ Herculis fedési kettős új *VRI* szűrős CCD fotometriai eredményeit mutattam be. Az ezekhez felhasznált adatokat 9 éjszaka során vettem fel 2002 nyarán. 4 új epochát számítottam ki az elsődleges minimumok esetében. Nem detektáltunk rövid időskálájú fényváltozást, ami pulzáló komponens(ek) jelenlétére utalna. Az O–C diagram alapján az SZ Her esetleg egy harmadik komponenssel is rendelkezik.



46. ábra. Az SZ Her fedési kettős O–C diagramja.

6. Kisbolygók fotometriai vizsgálata

6.1. Bevezetés

Több mint 200 évvel az első főövbeli kisbolygó, az 1 Ceres felfedezése óta nagy mértékben automatizált és kellően érzékeny felmérések korábban elképzelhetetlen mennyiségben ontják a frissen felfedezett kisbolygókat. 2009. május 9-én a felfedezett aszteroidák száma 453491, ezek közül 215098 sorszámozott, míg 15190 már nevet is kapott⁸. A folyamat jelenleg is egyre gyorsul és a megfigyelések a leghalványabb, így legkisebb kisbolygók birodalmát ostromolják (pl. Morbidelli és mktsai, 2002). A mások oldalról viszont a megfigyelt objektumok nagy száma erős korlátokat jelent ezeknek az égitestek esetében azok fizikai tulajdonságainak meghatározásában és megértésében. Ezek az újonnan felfedezett kisbolygók minden különösebb figyelem felkeltése nélkül kerülnek bele az elektronikus katalógusokba: a naprendszerbeli égitestek egyre nagyobb hányadát ismerjük meg anélkül, hogy a megfigyelhető tulajdonságaikról (pl. forgás, alak) információt szereznénk. A fentebb említett tényekből kifolyólag egy új megfigyelési terület alakult ki, amelyhez egy kisebb főiskolai/egyetemi obszervatórium vagy akár még egy megfelelő eszközökkel rendelkező, jól felszerelt amatőr csillagász is jelentős hozzájárulást tud nyújtani: a közepesen halvány (hozzávetőleg 12 magnitúdótól 17 magnitúdóig) és kisméretű aszteroidák felfedezést követő fotometriai megfigyelésének területe. A kisbolygók forgási paramétereinek tanulmányozása (Binzel és mktsai, 1989, Fulchignoni és mktsai, 1995, Pravec & Harris, 2000) nagy mennyiségű, időben jól felbontott fotometriai adatot igényel például a szinodikus forgási periódus meghatározására (lásd pl. Angeli és mktsai, 2001), így a kisbolygó fénygörbék periódusmeghatározása potenciálisan hasznos projekt kis és közepes méretű távcsövek számára. A hosszú távú fotometriai nyomon követés lehetővé teszi a forgási periódus változásán keresztül a YORP-effektus (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack-effektus) detektálását (például Durech és mktsai, 2008 az 1620 Geographos esetében).

Egyetemi csoportunk 1998 óta dolgozik olyan fotometriai projekten, amely főövbeli és földsúroló kisbolygók forgási paramétereinek tisztázását tűzte ki célul (Sárneczky és mktsai, 1999; Kiss és mktsai, 1999; Szabó és mktsai, 2001; Székely és mktsai, 2005). A fő célja ennek a projektnek az, hogy segítségével kiterjesszük a rendelkezésre álló adatbázist a halványabb, ezért kisebb aszteroidák tartománya felé. Ebben a fejezetben az 1999 és 2003 között, 23 kisbolygó esetében végzett új fotometriai megfigyeléseim eredményeit mutatom be, melyet részben egyetemi diplomamunkámhoz, részben doktori ösztöndíjam kezdeti kutatásaiént végeztem.

⁸<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/ArchiveStatistics.html>

6.2. Megfigyelések és adatfeldolgozás

1999. szeptember és 2003. február között 39 éjszakán végeztem CCD megfigyeléseket. A vizsgált égitestek geometriai adatait a 15. táblázatban tüntettem fel, míg a mérések részletes technikai adatai a 16. táblázatban találhatóak. Standard Johnson R szűrős és szűrő nélküli adatokat a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete piszkéstetői obszervatóriumában található 60/90/180 cm Schmidt-távcsövével rögzítettem, amelyen egy Photometrics AT200 CCD kamera (1536×1024 , KAF 1600 MCII réteges CCD chip) van felszerelve. A leképzett látómező $29' \times 18'$, ami megfelel $1,1''$ /pixeles képskálának. A kamera üzemi hőmérséklete a megfigyelések során -40°C alatti volt.

Az adatok döntő többségét a Szegedi Csillagvizsgáló 0,4 méteres Cassegrain-távcsövével vettem fel, ami Szeged városának külső területén található. Ennek ellenére meglehetősen erős a fényszennyezés, ami hátráltatja a távcsöves munkát. Ezt a távcsövet egy hűtött SBIG ST-9E CCD kamerával használtam (512×512 darab, $20\mu\text{m}$ méretű, 2×2 binnelt pixelek, a képskála $1,4''$ /pixel). A látómező mindössze $6' \times 6'$ volt. A legtöbb R szűrős és szűrő nélküli adatokat ezzel a konfigurációval rögzítettem. Az elért fotometriai pontosság 0,01–0,1 mag között változott a célpont fényességétől és a légköri viszonyoktól függően, tipikusan $0,05^m$ volt. A pontosság becslését az összehasonlító és az ellenőrző adatok különbségének RMS szórása alapján végeztem.

Számos kritérium alapján választottam célobjektumot a fotometriai megfigyelések számára. Az általam használt távcsövek kis apertúrája miatt korlátozott volt az elérhető fényességtartomány, rendszerint $17,0^m$ felett a 0,6 méteres Schmidt-távcsövvel és $15,0^m$ felett a 0,4 méteres Cassegrain-teleszkóppal. Az alkalmazott expozíciós időket két tényező limitálta. Először is az objektumok az expozíciós idő alatt nem mozdulhattak el többet, mint a csillagok félértékszélességének (FWHM) a fele, ez utóbbi érték egyébként éjszakáról éjszakára változott. Másrészt viszont a jel/zaj viszonyt legalább 10-es értéken kellett tartani. Ezt a paramétert úgy becsültem a mérések folyamán, hogy összevetettem a legmagasabb pixelértékeket a háttérrel.

A CCD mérések redukálása standard IRAF rutinokkal történt, beleértve a flat-field korrekciót, amihez az esti és/vagy reggeli szürkületben vettem fel sky-flat képeket. A differenciális fényességek kiszámításához gyors apertúra fotometriát használtam (*qphot* és *phot* rutinok) két vagy több közeli, hasonló fényességű összehasonlító csillagot kimérve. A csillagokat a Hubble Űrtávcsőhöz összeállított Vezetőcsillag Katalógusból (Guide Star Catalogue, GSC) választottam. Mivel a kisbolygók sok esetben a rövid expozíciós idők ellenére is csíkot húztak a felvételeken, nem próbálkoztam PSF fotometriával. Néhány esetben az adatok szórása indokolta a zajszűrő eljárások igénybevételét, például a deviáns pontok kiszűrését a lokális standard deviáció figyelembevételével (angol kifejezéssel *sigma clipping*), illetve medián szűrést 3, 5, 7, illetve 9 szomszédos mérési pont felhasználásával.

15. táblázat. Geometriai adatok a megfigyelések középidejében. Rövidítések: r=heliocentrikus távolság [csillagászati egység, CSE], Δ =geocentrikus távolság [CSE], α =szoláris fázis [fok], λ =geocentrikus hosszúság [fok], β =geocentrikus szélesség [fok]

Kisbolygó	V	Dátum ^a	r	Δ	α	λ	β
469 Argentina	12, ^m 9	2002.01.30.91	2,857	1,922	7,69	110,88	10,51
531 Zerlina	15, ^m 4	2002.06.08.87	2,232	1,445	20,50	105,07	50,46
546 Herodias	13, ^m 2	2002.01.23.04	2,320	1,449	14,40	95,30	24,00
549 Jessonda	13, ^m 6	2002.02.16.04	2,115	1,169	10,45	124,65	-2,84
697 Galilea	14, ^m 4	2003.02.18.08	3,287	2,325	4,72	149,30	15,69
756 Lilliana	14, ^m 2	2001.07.12.08	2,950	2,042	10,74	86,17	28,64
894 Erda	13, ^m 4	2001.07.18.91	2,741	1,771	7,54	52,18	18,37
1026 Ingrid	17, ^m 0	2003.02.18.91	2,662	1,694	5,43	136,14	5,06
1108 Demeter	14, ^m 3	2001.02.08.83	1,804	0,974	25,51	66,02	47,62
1170 Siva	13, ^m 5	2001.07.10.04	1,744	0,754	7,04	14,76	12,32
1270 Datura	15, ^m 8	2000.10.13.91	1,955	1,342	28,17	88,23	-5,37
1286 Banachiewicz	14, ^m 7	2001.08.15.04	2,756	1,760	4,71	36,96	14,14
1400 Tirela	15, ^m 0	2001.08.09.91	2,377	1,465	13,64	65,32	25,36
1503 Kuopio	14, ^m 5	2001.10.10.91	2,738	1,769	6,21	11,30	16,13
1506 Xosa	13, ^m 8	2001.07.31.91	1,936	0,971	13,14	61,44	23,93
1695 Walbeck	15, ^m 3	2001.08.29.79	2,071	1,195	18,30	52,75	28,97
2448 Sholokhov	14, ^m 0	2003.02.18.91	2,612	1,644	5,54	136,21	5,05
3682 Welther	13, ^m 7	2001.08.29.91	1,930	0,988	14,97	10,93	27,32
3682 Welther	13, ^m 9	2001.10.06.91	1,888	1,003	20,05	17,01	25,19
5349 Paulharris	14, ^m 2	2002.10.16.08	1,721	0,775	15,60	27,72	27,14
5690 1992 EU	15, ^m 6	2000.10.12.95	1,776	1,218	32,77	89,85	36,29
6510 Tarry	15, ^m 3	2002.06.12.95	1,853	1,010	23,68	73,61	42,14
7505 Furushu	14, ^m 3	2000.10.14.95	1,719	0,968	29,49	79,58	-6,77
11436 1969 QR	16, ^m 9	1999.09.29.87	2,055	1,077	8,231	5,98	12,20

^a a megfigyelések középideje

16. táblázat. A megfigyelések technikai adatai

Kisbolygó	Dátum	Távcső*	Szűrő	Exp. idő [mp]	Időtartam [ó]
469 Argentina	2002.01.28	a	X	40	6,0
	2002.01.30	a	X	40	9,8
	2002.02.01	a	X	40	7,4
531 Zerlina	2002.06.08	b	R	90	4,3
546 Herodias	2002.01.22	a	X	45	8,6
	2002.01.23	a	X	45	8,2
549 Jessonda	2002.02.15	a	X	30	2,2
697 Galilea	2003.02.18	b	R	90	1,7
756 Lilliana	2001.07.10	a	R	45	3,1
	2001.07.11	a	R	45	6,5
	2001.07.29	a	R	45	4,8
	2001.08.08	a	R	45	5,0
894 Erda	2001.07.17	a	R	45	3,4
	2001.07.18	a	R	45	7,0
	2001.07.19	a	R	45	6,5
1026 Ingrid	2003.02.18	b	X	90	3,6
1108 Demeter	2001.08.01	a	R	45	7,2
	2001.08.02	a	R	45	6,0
	2001.08.27	a	R	45	6,0
1170 Siva	2001.10.06	b	R	60	3,6
1270 Datura	2000.10.13	b	R	60	3,6
1286 Banachiewicz	2001.08.14	a	X	40	1,2
1400 Tirela	2001.08.08	a	X	45	1,4
	2001.08.09	a	X	45	7,0
	2001.08.13	a	X	45	7,0
	2001.08.14	a	X	45	6,5
1503 Kuopio	2001.10.09	b	R	60	8,4
	2001.10.10	b	R	60	3,8
	2001.10.11	b	R	60	2,2
1506 Xosa	2001.07.30	a	R	45	6,7
	2001.07.31	a	R	45	6,7
	2001.08.07	a	R	45	7,4
1695 Walbeck	2001.08.28	a	X	60	6,5
	2001.08.29	a	X	60	6,5
	2001.08.30	a	X	60	1,7
2448 Sholokhov	2003.02.18	b	X	90	3,6
3682 Welther	2001.08.29	a	X	60	2,4
	2001.08.30	a	X	60	7,0
	2001.10.06	b	R	60	3,1
	2001.10.08	b	R	60	4,6
5349 Paulharris	2002.10.15	b	R	90	0,7
5690 1992 EU	2000.10.12	b	R	60	6,2
	2000.10.13	b	R	60	4,3
6510 Tarry	2002.06.12	b	R	120	5,3
7505 Furushu	2000.10.14	b	R	60	2,4
	2000.10.15	b	R	60	4,8
11436 1969 QR	1999.09.29	b	X	240	4,1

* A használt távcsövek: (a) 0,4 m Cassegrain (b) 0,6 m Schmidt

nálásával.

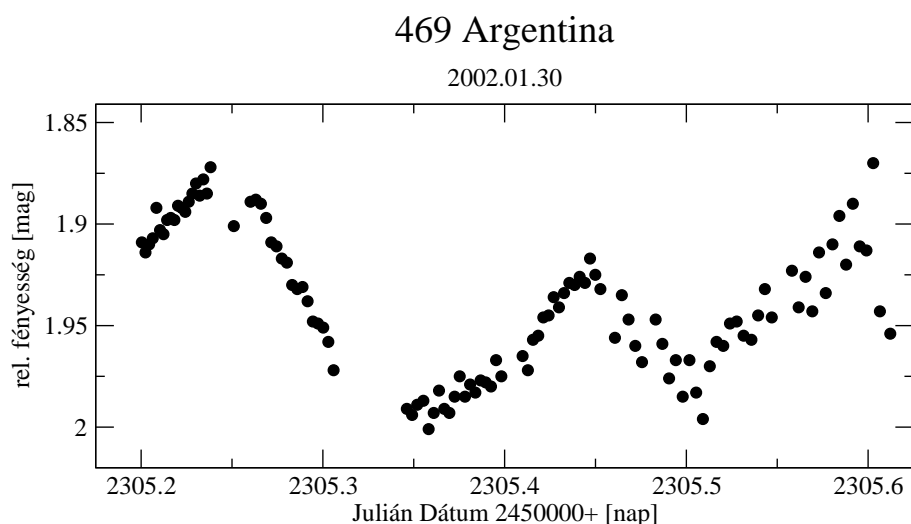
A periódus meghatározását egy saját fejlesztésű C++ nyelven írt programmal végeztem, ami felhasználta a módosított fázisdiszperziós módszert (Stellingwerf, 1978). A módosítás magában foglalta az egyedi éjszakára jellemző fotometriai zéruspont meghatározását, amelyet az éjszakánként használt más és más összehasonlító csillag okozott. Az optimális periódust és fényességeltolásokat grid-search módszerrel határoztam meg.

6.3. Eredmények

Értekezésem ezen részében 23 főövbeli kisbolygó esetében végzett CCD megfigyelések eredményét mutatom be, amelyek közül korábban 8-at nem vizsgáltak, így az ezekről az objektumokról származó mérési adatok az elsők a szakirodalomban. Az észlelt égitestek többsége jól detektálható fényességváltozást mutatott, amely meghaladta a 0^m1 -t. A következő kisbolygók számára határoztam meg szinodikus forgási periódusokat: 756 Lilliana (9^h36), 1270 Datura (3^h4), 1400 Tirela (13^h36), 1503 Kuopio (9^h98), 3682 Welther (3^h59), 7505 Furushu (4^h14) and 11436 1969 QR (2^h6), míg bizonytalan periódus becsléseket tehettem a következő égitestek esetében: 469 Argentina (12^h3), 546 Herodias (10^h4) and 1026 Ingrid (5^h3). A fénygörbe alakja a 3682 Welther esetében rövid időskálán változott és elhalványodásokat mutatott, amelyek okai lehetnek egy esetleges kettős rendszerbeli fedési jelenségek. A fennmaradó többi objektumra csupán a periódusok és amplitúdók alsó korlátjának megadása volt lehetséges. Bemutatom az egyedi kisbolygók egyszerű, illetve kompozit fénygörbéjét és ismertetem a kapott forgási paramétereket.

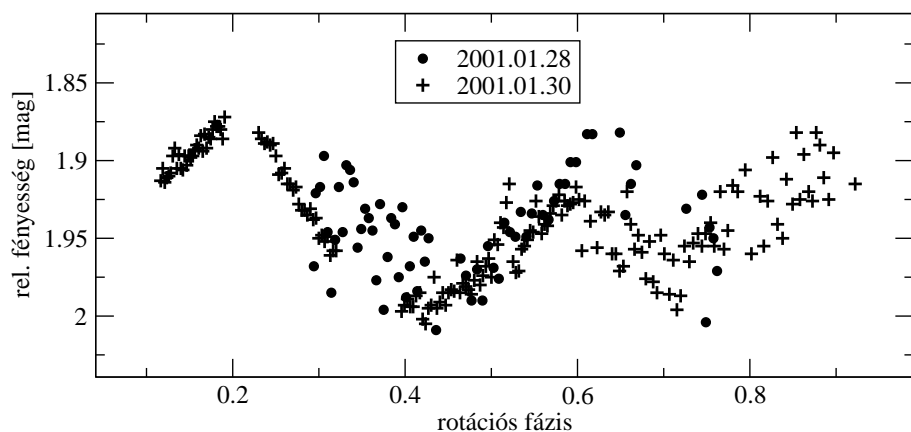
6.3.1. 469 Argentina

A 469 Argentina volt az általam megfigyelt legnagyobb kisbolygó (az átmérője megközelíti a 130 km-t). A fénygörbe egyenlőtlen maximumokkal rendelkezik és megfigyelhető egy közel lineáris szakasz a bemutatott szűrő nélküli fénygörbe első harmadában. Az éjszaka második felében uralkodó ködös, párás időjárás okozta a megnövekedett szórást. A meglehetősen kicsi amplitúdó ellenére az égitest jól detektálható fényváltozást mutatott, amely elérte az 0^m14 -t. A kisbolygó fénygörbéje a 47. ábrán látható. A becsült szinodikus periódus 12^h3 . Az első két éjszaka adatait felhasználó kompozit fénygörbe a 48. ábrán tekinthető meg. Ezen égitest esetében Wang (2003) körülbelül 3 órát ad meg forgási periódusnak, de fénygörbét nem közölt és eredményeinek megbízhatósága is alacsony. Wang és mksai (2005) a mi adatainkat és újabb megfigyeléseket felhasználva alapos elemzésnek vetették alá az égitest különös fényváltozását. Analízisük szerint a kisbolygó forgástengelye precesszáló mozgást végez, az égitest forgása nem a főtengely mentén történik (Non-Principal Axis (NPA)-rotátor, Pravec és mksai, 2005), hanem mintegy „bukdácsoló” mozgást végez (angol kifejezéssel *tumbling*). Az adatok Fourier analízise szerint a precesszió periódusa 13,004 óra, míg a forgásé 8,627 óra. A helyzet



47. ábra. A 469 Argentina fénygörbéje.

469 Argentina kompozit fénygörbe



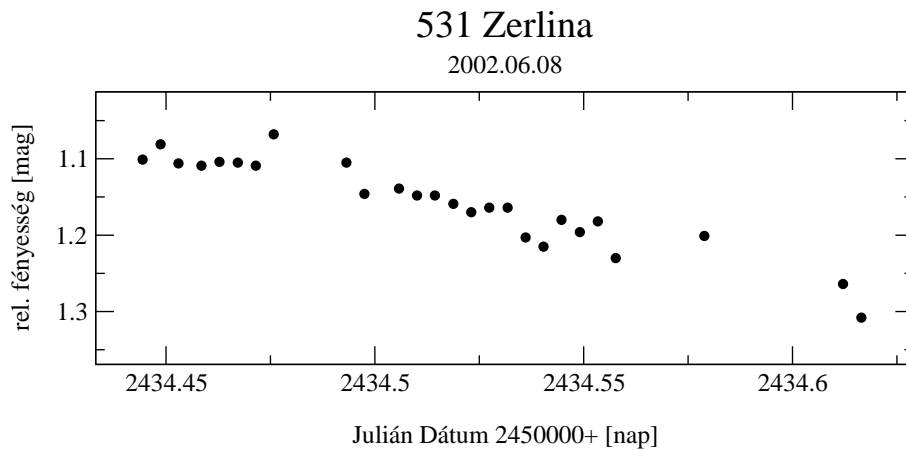
48. ábra. A 469 Argentina kompozit fénygörbéje.

tisztázása érdekében hosszútávú fotometriai méréssorozatra lenne szükség.

6.3.2. 531 Zerlina

A csupán egyetlen éjszakára terjedő megfigyelés során az 531 Zerlina monotonnak tűnő fényváltozást produkált mintegy 4 órán keresztül, amely a 49. ábrán látható. Az R -szűrős tartomány meghaladja a 0^m17 -t. Ez az égitest valószínűleg hosszú forgási periódussal rendelkezik. Raoul Behrend (Observatoire de Genève) honlapján⁹ is találhatóunk adatokat erre a kisbolygóra vonatkozóan, a megfigyelő Bernard Christophe volt. Az általuk megadott értékek: 2^h352 a szinodikus periódusra illetve 0^m12 a fényváltozás amplitúdójára. Azonban - az ott talált rotációs fázis diagram alapján megítélve - ez a periódus nem tűnik jól illeszkedőnek. Brinsfield (2008) 8 éjszakára kiterjedő, teljes fázisbeli lefedett-

⁹<http://obswww.unige.ch/~behrend/page2cou.html>



49. ábra. Az 531 Zerlina fénygörbéje.

séget biztosító mérések alapján 16,716 órát ad meg forgási periódusnak, míg a detektált amplitúdó 0^m41 volt.

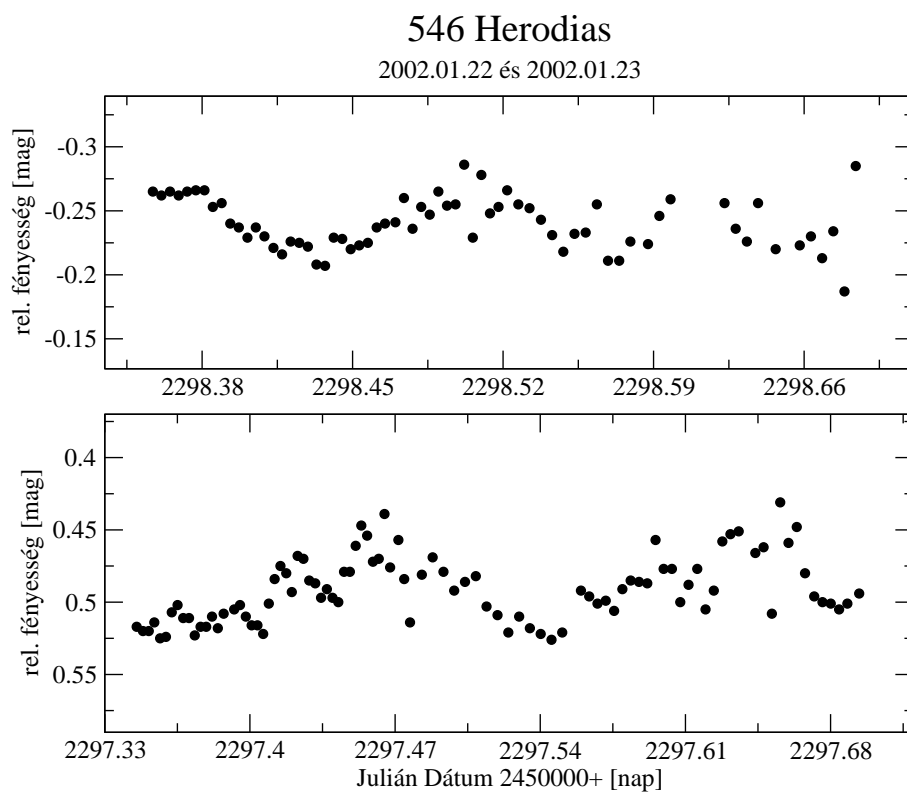
6.3.3. 546 Herodias

Annak ellenére, hogy ez a kisméretű égitest jól detektálható fényváltozást mutatott, a kicsi, 0^m07 -ös amplitúdó később elveszett a zajban a bekövetkezett kedvezőtlen megfigyelési körülményeknek köszönhetően. A legjobb illesztés 10^h4 -t ad szinodikus periódusnak, azonban ez meglehetősen bizonytalan érték. Az 546 Herodias szűrőzetlen fénygörbéje a 50. ábrán látható. A szakirodalomban nem találtam más fénygörbét.

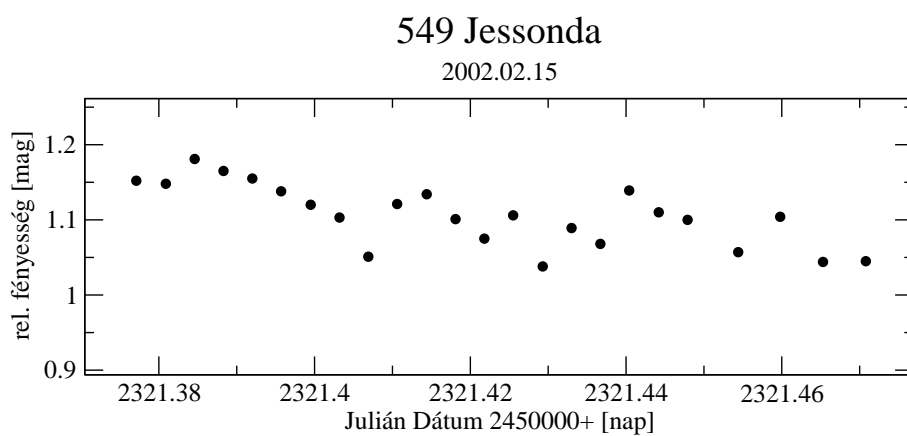
6.3.4. 549 Jessonda

Az 549 Jessonda egyetlen éjszakára kiterjedő rövid fénygörbéje nem mutatta a változás egyértelmű mintázatát a szóráson túl. A kisbolygók fénygörbéjének együttműködésen alapuló vizsgálatára szakosodott CALL (Collaborative Asteroid Lightcurve Link) honlapján¹⁰ megtalálható néhány forgási paraméter ezen égitest esetében. Stephen M. Brincat és Robert Koff végezte a megfigyeléseket, amelyek a CALL honlapján találhatóak, illetve Laurent Bernasconi gyűjtötte az adatokat a Behrend-féle weboldal számára. 5 éjszakára kiterjedő megfigyelésekre alapozva a szinodikus periódus 4^h5 és az amplitúdó 0^m1 , viszont nem közöltek fénygörbét. Ezen adatok megbízhatósága alacsony. A detektált kis amplitúdó mellett a mi fénygörbénk kedvezőtlen időjárási körülmények mellett készült, így nem inkonzisztens a CALL fentebb említett eredményeivel. Locrone és mktsai (2006) csupán zajt detektáltak a kisbolygó mérése során, míg Warner (2006) $5,938$ órát illetve 0^m1 -t ad meg a fényváltozás jellemzőiként.

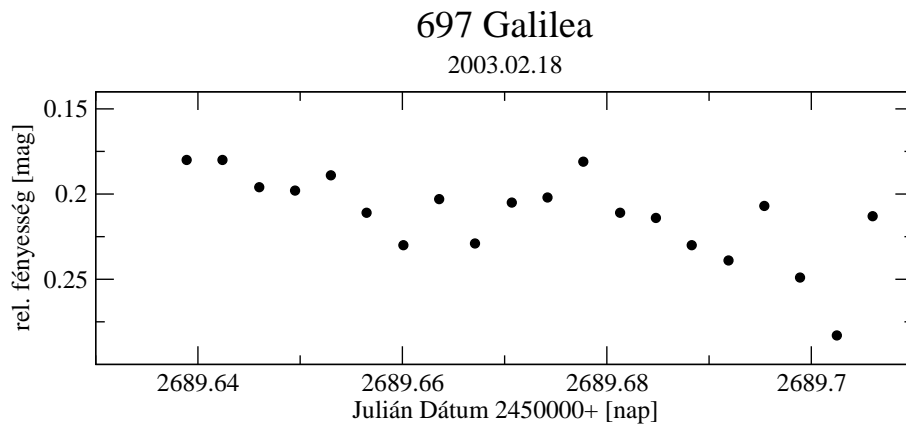
¹⁰http://www.minorplanetobserver.com/DATA/submissions_results.htm



50. ábra. Az 546 Herodias fénygörbéje.



51. ábra. Az 549 Jessonda fénygörbéje.



52. ábra. A 697 Galilea fénygörbéje.

6.3.5. 697 Galilea

Ezt kisbolygót 2001. decemberében már észlelte Sheridan (2002), akinek eredményei szerint a periódus $16^{\text{h}}538 \pm 0^{\text{h}}002$, az amplitúdó pedig $0^{\text{m}}28$. Az én egy éjszakás fénygörbém - amely csupán 1,7 órás időtartamot ölel fel - egy közepes lineáris trendet mutat, ami konzisztens ezekkel az eredményekkel, amint ez a 52. ábrán is látható.

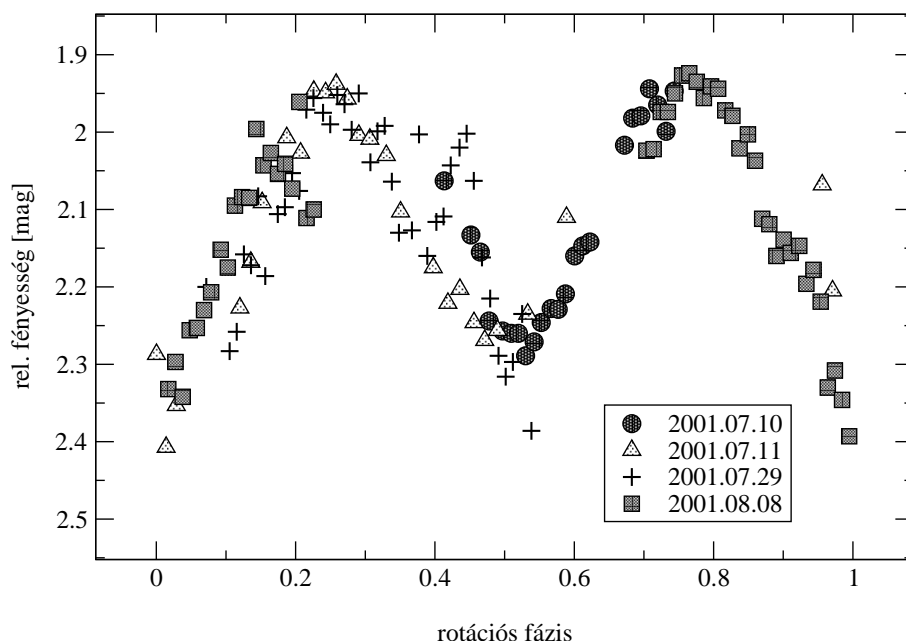
6.3.6. 756 Lilliana

A 756 Lilliana volt az első célpontja a 0,4 méteres Cassegrain-távcsővel végzett megfigyeléseknek. A kapott görbe $0^{\text{m}}56$ R -szűrős amplitúdót jelez aszimmetrikus púpokkal és egyenlőtlen minimumokkal. A négy külön megfigyelési szakasz adatait összefogva az egyedi éjszakák fénygörbéi jól észrevehető deformációt mutatnak. Az eredményül kapott szinodikus periódus $9^{\text{h}}361 \pm 0^{\text{h}}002$. Raoul Behrend honlapján megtalálható rotációs periódusra vonatkozó érték $6^{\text{h}}151$, ami $1^{\text{m}}0$ körüli amplitúdóval párosul. Ezen eredmény több megfigyelő adatán alapul és ideiglenesként van megjelölve. Az én négy éjszakát felölelő megfigyeléseimből származó adatok analízise a fentebb említett periódust adja a legkisebb szigmával, azaz $9^{\text{h}}361$. Ha $6^{\text{h}}151$ -t alkalmazunk, mint szinodikus periódust, az adataim nem állnak össze kompozit fénygörbévé. Mindazonáltal nem zárhatjuk ki, hogy a pontos forgási periódus értéke az általam meghatározottól is különbözik, így további vizsgálatokat javaslok a bizonytalanság tisztázása érdekében. Az adataimból készített kompozit fénygörbe a 53. ábrán látható.

6.3.7. 894 Erda

A körülbelül 40 km átmérőjű 894 Erda furcsa viselkedést mutatott. Amint az a 54. ábrán látható a megfigyelések alatt kis amplitúdóval párosuló ciklikus fényváltozást detektáltam. A görbe érdekes tulajdonsága egy hirtelen éles elhalványodás, ami a grafikon közepéhez közel látható. A jelenség egyik lehetséges magyarázata a 894 Erda esetleges

756 Lilliana kompozit fénygörbe



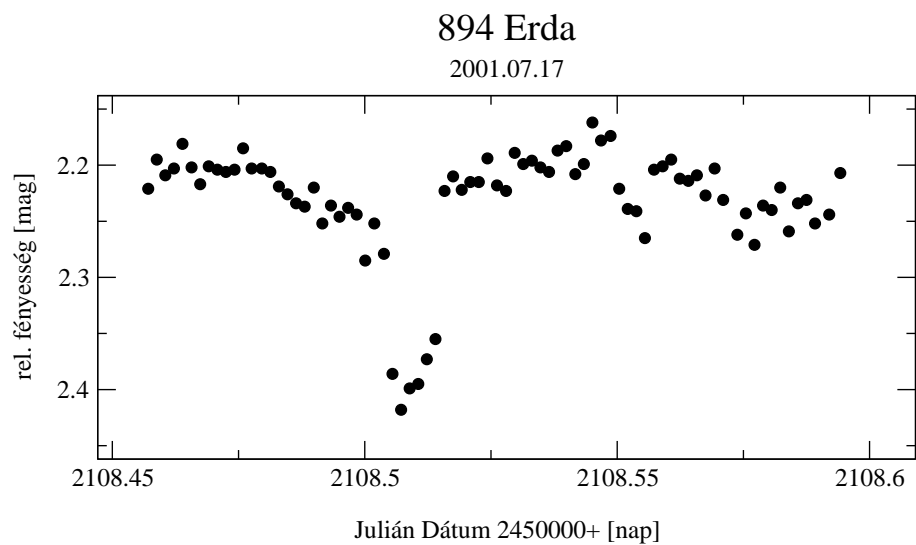
53. ábra. A 756 Lilliana kompozit fénygörbéje.

kettőssége. Ezt feltételezve az elhalványodást a hipotetikus másodkomponens okozza. Sajnálatos módon nem jártam sikerrel, hogy a következő éjszakákon ismét megfigyeljem a fedést.

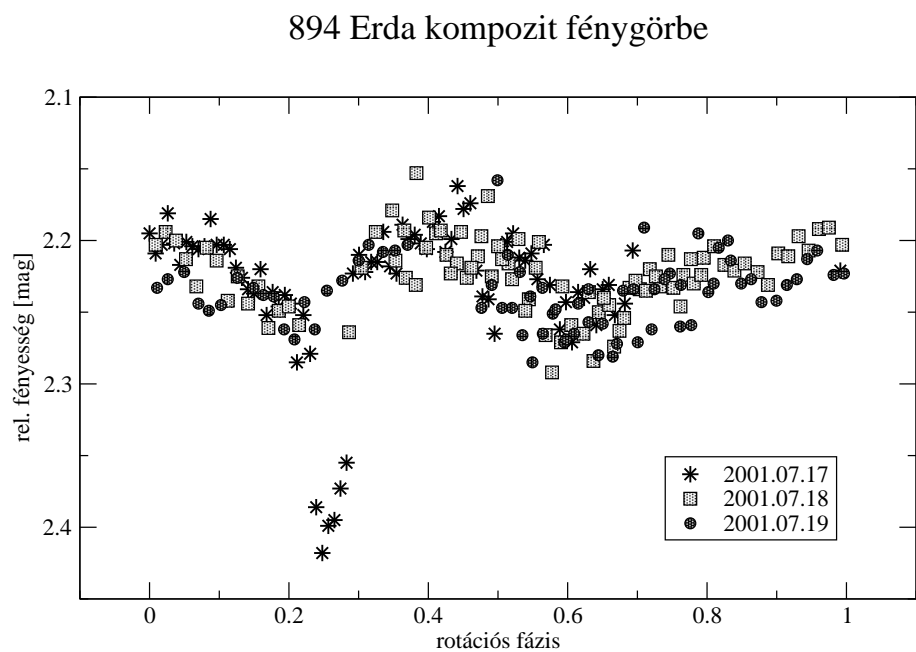
Az eredményeim mellett a 894 Erda kisbolygót 5 éjszakán át szintén megfigyelték 2001. július 15. és 19. között a kaliforniai (USA) Santana Observatóriumból (Stephens 2002). Annak ellenére, hogy ezek az adatok meglehetősen közel esnek időben az általam bemutatottakhoz, az észlelők nem detektáltak fényességcsökkenést. A cikk szerzője $4^{\text{h}}69 \pm 0^{\text{h}}01$ -t számított mint forgási periódus. A megfigyelt $0^{\text{m}}08$ amplitúdó összhangban van az adataimmal. A három éjszaka adatát felhasználó kompozit fénygörbém $4^{\text{h}}69$ -t használva rotációs periódusként a 55. ábrán látható.

6.3.8. 1026 Ingrid

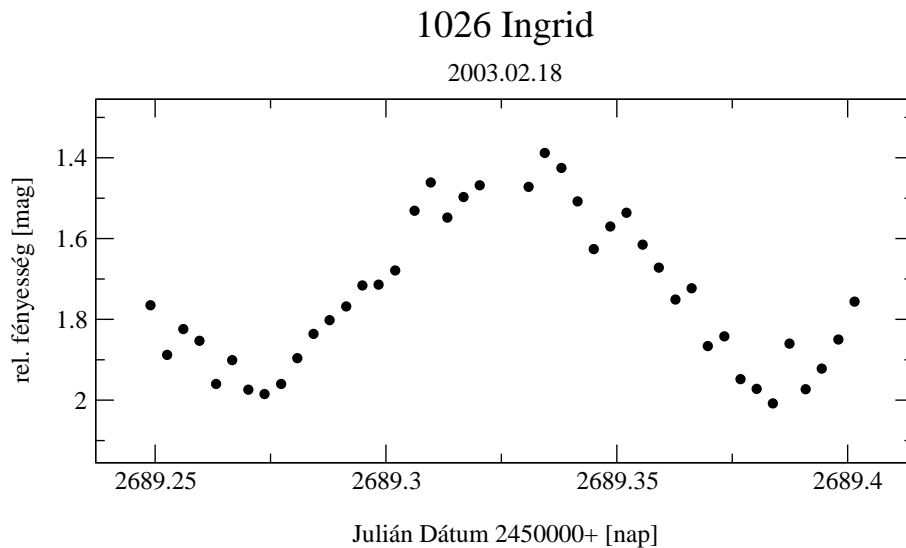
Ez a nagyon kicsi égitest volt a leghalványabb általam vizsgált kisbolygó és a 2448 Sholokhov megfigyelése során szerencsés véletlennek köszönhetően került távcsővégre: az addig fotometriailag nem vizsgált két égitest 2003. február 18-án ugyanazon CCD képekre került. A $17^{\text{m}}0$ -s objektum fénygörbéje a 56. ábrán látható és gyors forgásra utal. Ez az egy fénygörbe kevesebbet fed le mint a teljes rotációs ciklus. A két minimum közötti idő szinte bizonyosan közel van a teljes forgási periódus feléhez, mivel az amplitúdó meglehetősen nagy, $>0^{\text{m}}5$. Ezért a teljes periódus hozzávetőleg $5^{\text{h}}3 \pm 0^{\text{h}}3$ lehet.



54. ábra. A 894 Erda fénygörbéje.



55. ábra. A 894 Erda kompozit fénygörbéje.



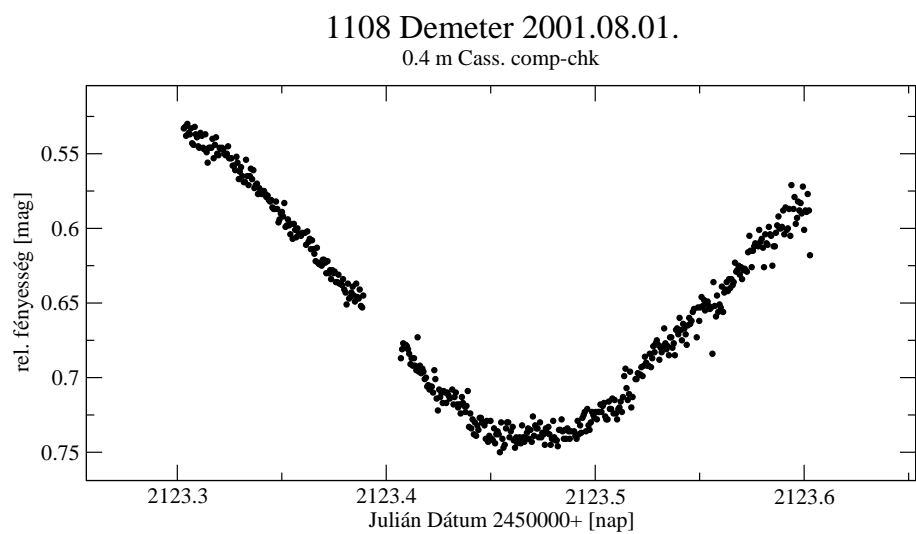
56. ábra. Az 1026 Ingrid fénygörbéje.

6.3.9. 1108 Demeter

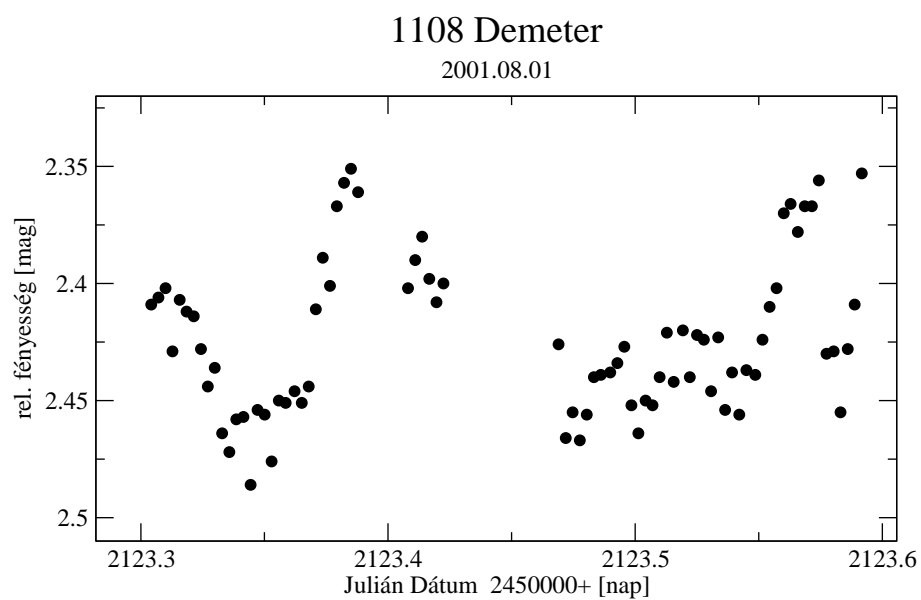
Ez a közepes méretű aszteroida a mérések 3 éjszakája alatt nagyon nehezen értelmezhető fényváltozásokat mutatott. A fénygörbék egyike a 58. ábrán tanulmányozható. Az R -szűrős amplitúdó 0^m15 . A kisbolygó bizarr fénygörbéjét Behrend honlapján is megjegyzik. Az égitest komplex fényváltozását nehéz megmagyarázni. Az egyik lehetőség erre a forgástengely gyors precessziója, illetve kettősség. A kisbolygó megfigyelése mellett felfedeztem a GSC 2127-0056 jelű csillag fényváltozását, ami 2001. augusztus elsején összehasonlítként szolgált. Az egy éjszakányi adatokon látszó 0^m2 amplitúdó és a fényváltozás alapján megítélve a csillag esetleg fedési kettős lehet. A csillag fénygörbéje a 57. ábrán látható. Megfigyeléseim mellett összesen 151 adatpontot rögzítettek a Santana Obszervatórium észlelői több alkalommal 2001. július 9. és 29. között (Stephens 2002). Szinodikus periódusra $9^h70 \pm 0^h01$ értéket kaptak. A szűrő nélküli amplitúdó 0^m17 volt, jó egyezésben az én eredményemmel. A közölt fénygörbe teljesen megszokottnak tűnik minden anomális jellegzetesség nélkül. Ha 9^h70 -t alkalmazunk mint szinodikus periódus, az én kompozit fénygörbém nem illeszkedik túlságosan jól, amint az a 59. ábrán is látható.

6.3.10. 1170 Siva

A 1170 Siva fénygörbéje a 60. ábrán látható. A komplex fénygörbealak két egyenlőtlen extrémum jelenlétét mutatja, ámbar a megfigyelési időtartam meglehetősen rövid és az R -szűrős amplitúdó is csupán 0^m07 . A fénygörbe alapján megítélve a szinodikus periódus 3^h5 körül lehet. A Behrend-féle honlap 5^h215 -t ad meg mint periódus, a fénygörbe amplitúdója mindössze 0^m04 és a periódus bizonytalan. Érdekes megjegyezni, hogy a két periódus aránya majdnem pontosan $2/3$, ami arra utalhat, hogy a valódi periódus a két

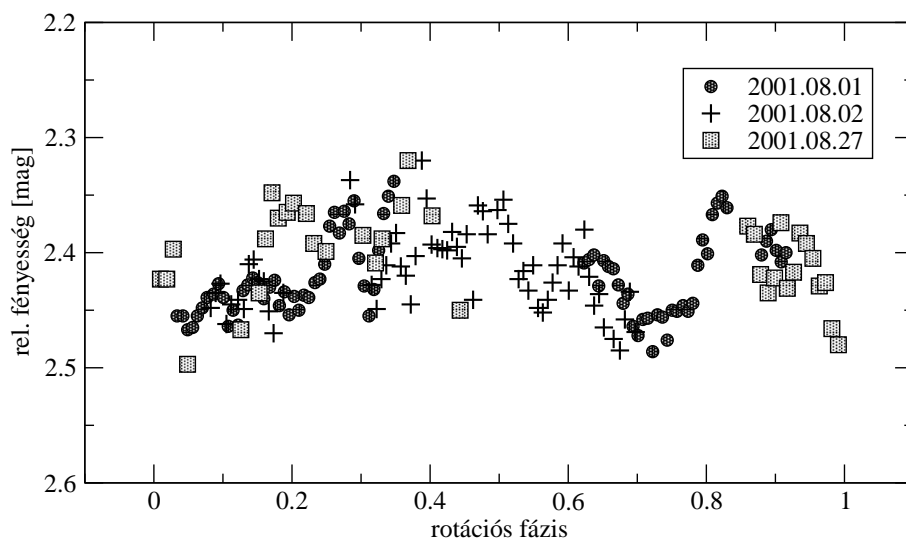


57. ábra. A GSC 2127-0056 fénygörbéje.



58. ábra. Az 1108 Demeter fénygörbéje.

1108 Demeter kompozit fénygörbe



59. ábra. Az 1108 Demeter kompozit fénygörcbéje.

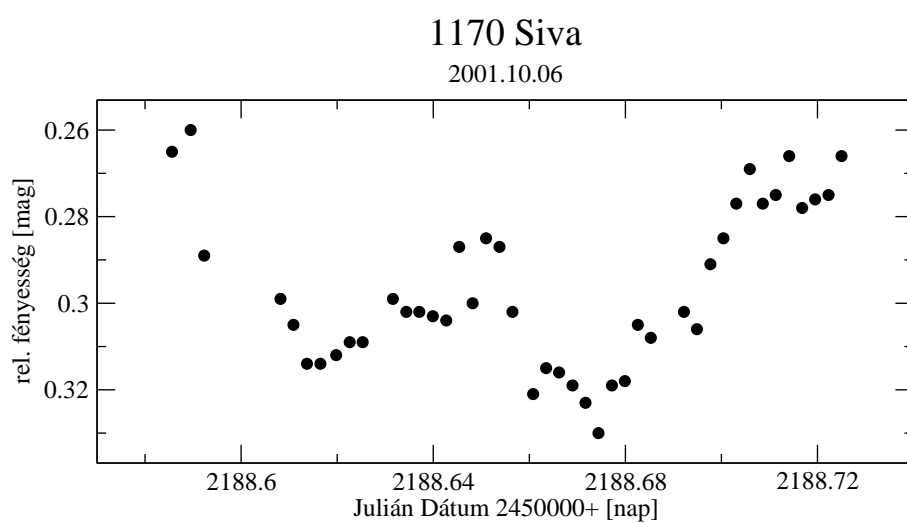
érték lineáris kombinációja, vagy valami hasonlóan egyszerű, kis egész számokkal leírható összefüggéssel megadható. További megfigyelések végzése ajánlott ezen objektum esetében is.

6.3.11. 1270 Datura

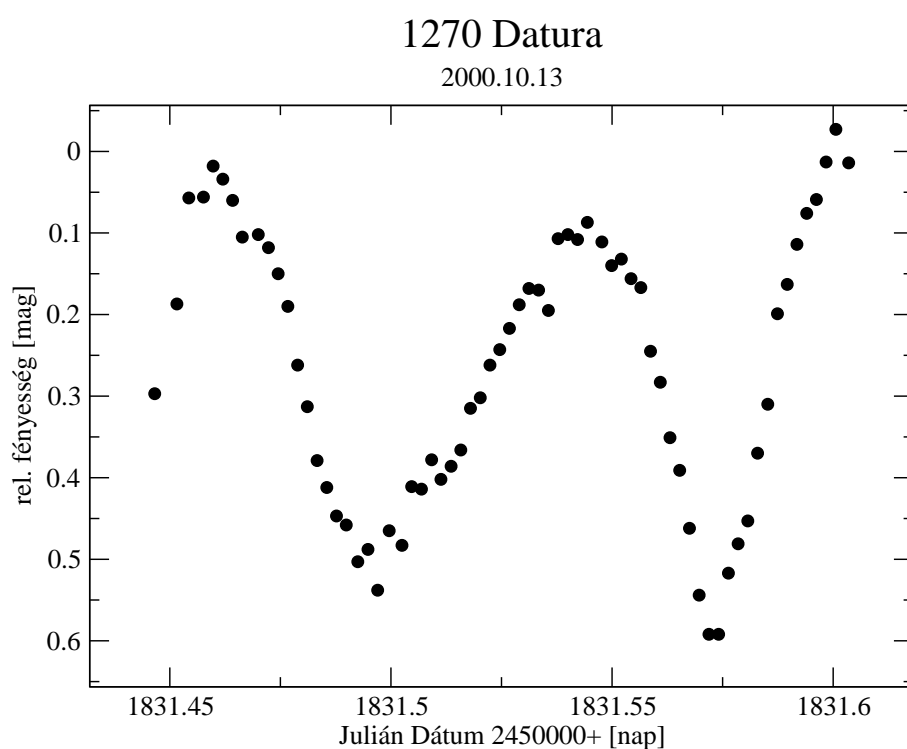
Ez a kisbolygó távcsöves megfigyelések célpontja volt két éjszaka során 1990-ben illetve 1991-ben (Wisniewski és mksai 1997). A detektált amplitúdó $0,^m41$ és a meghatározott szinodikus periódus értéke $3,^h2 \pm 0,^h1$. A második szakasz a forgási fázisnak csak egy tört részét fedte le. Ez, valamint a két hónap különbség a felvett két adathalmaz között nagy bizonytalanságot eredményezett a rotációs periódusban. A mi piszkéstetői megfigyeléseink $0,^m6$ feletti amplitúdót illetve $3,^h4 \pm 0,^h3$ szinodikus periódust sugallnak. Mindemellett a két periódus a bizonytalanságokon belül konzisztens egymással. Az *R*-szűrős fénygörbe a 61. ábrán látható. A diagram két púpot mutat különböző minimumokkal és maximumokkal. Ezen eredményekre hivatkozik Takato (2008) cikke is, amelyben az égitestnek a forgási periódus alatt többször felvett színeképeit elemzik, ennek célja a dinamikailag viszonylag fiatal (kb. 450 ezer éves, Nesvorny és mksai, 2006) égitest felszínén lévő friss területek azonosítása volt.

6.3.12. 1286 Banachiewiczza

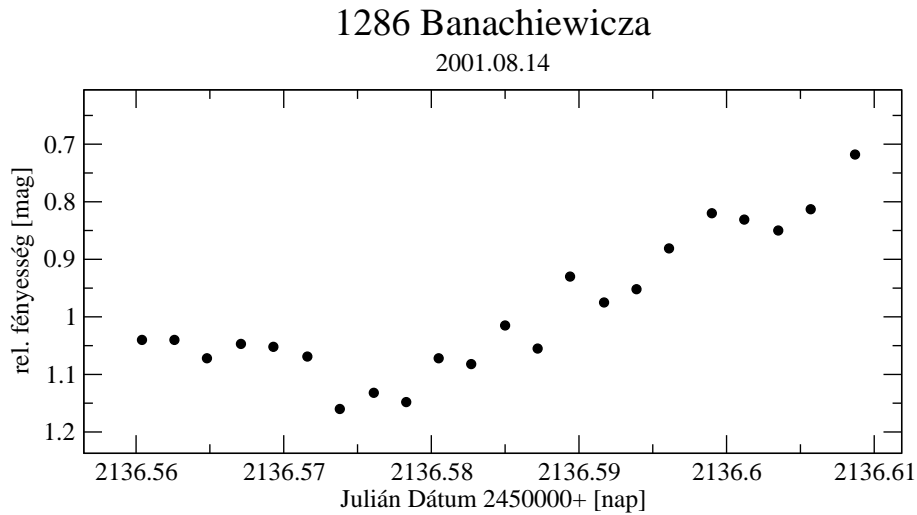
Az 1286 Banachiewiczza egyetlen rövid fénygörcbéje a minimumot fedi le, a mutatott fényváltozás amplitúdója nagyobb $0,^m4$ -nál. Behrend $8,^h6310$ -t ad meg periódusnak és $0,^m54$ -t amplitúdónak. Az én rövid, $1,^h2$ időtartamot felölelő adatsorom teljes mértékben összeegyeztethető ezekkel a paraméterekkel.



60. ábra. Az 1170 Siva fénygörbéje.



61. ábra. Az 1270 Datura fénygörbéje.



62. ábra. Az 1286 Banachiewiczza fénygörbéje.

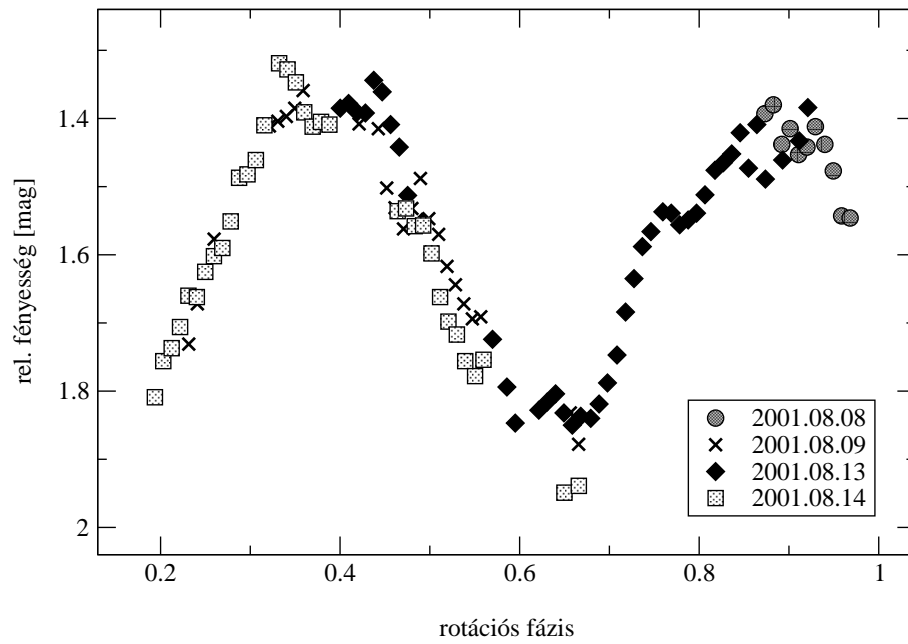
6.3.13. 1400 Tirela

Az 1400 Tirela (a különös Tirela kisbolygó család névadó objektuma, Mothé-Diniz & Nesvorný, 2008) négy éjszaka megfigyelési anyagát felhasználó fázisdiagramja a 63. ábrán látható. Érdeemes megjegyezni, hogy ez a kompozit fénygörbe nem fedti le a teljes forgási periódust. A fénygörbe mindkét ágán könnyen észrevehető irregularitások vannak, amelyeket valószínűleg felszíni geometriai alakzatok okozhatnak. A fényváltozás amplitúdója 0^m55 , míg a forgási periódus $13^h356 \pm 0^h007$. Behrend honlapján egy egy-éjszakai fénygörbe található, ami nem fedti le a teljes ciklust, a fényesség változás amplitúdója 0^m3 . A Behrend által javasolt forgási periódus $10^h3 \pm 5^h8$, ami többé-kevésbé összevethető az általam meghatározott értékkel. Annak ellenére, hogy az én eredményem több és pontosabb adaton alapul, nem zárhatjuk ki teljes bizonyossággal egy másik periódus jelenlétét. További megfigyelések végzése célszerű ezen égitest esetében.

6.3.14. 1503 Kuopio

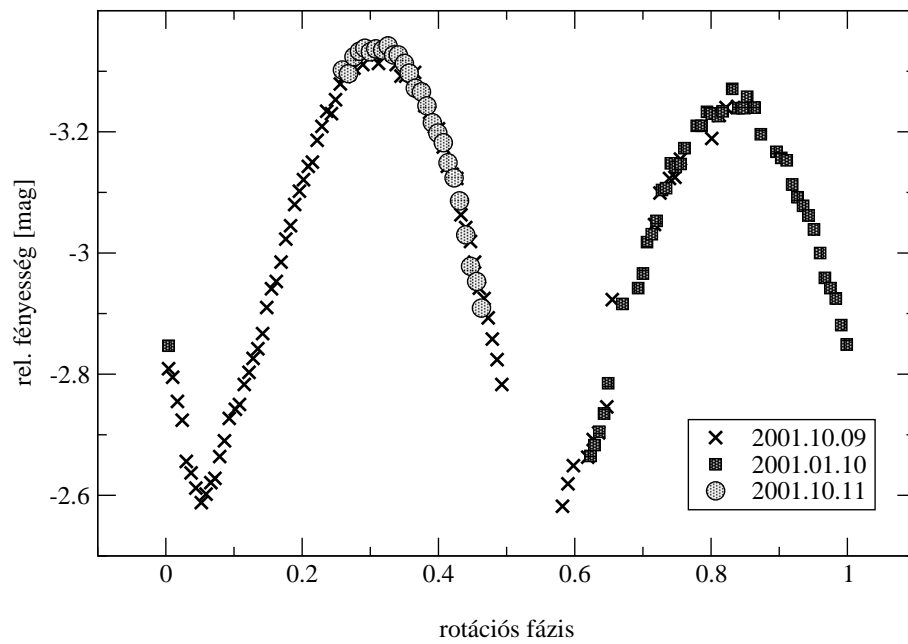
Az 1503 Kuopio kompozit fénygörbéje a 64. ábrán látható. Az adatok aszimmetrikus púpokat mutatnak meglepően egyenes fel- és leszálló ágakkal és éles minimummal. Az egyedi R -szűrős fénygörbék kis szórásúak, az általuk kirajzolt amplitúdó 0^m77 . A számított szinodikus periódus $9^h98 \pm 0^h03$. A Behrend által megadott érték a szinodikus periódusra 9^h958 , ezen érték kiszámítása teljes fázis lefedettségű adatokon alapul, ezért a periódus megbízhatósága meglehetősen jó. A megfigyelt fényváltozási amplitúdó 0^m69 és 1^m01 között mozgott.

1400 Tirela kompozit fénygörbe

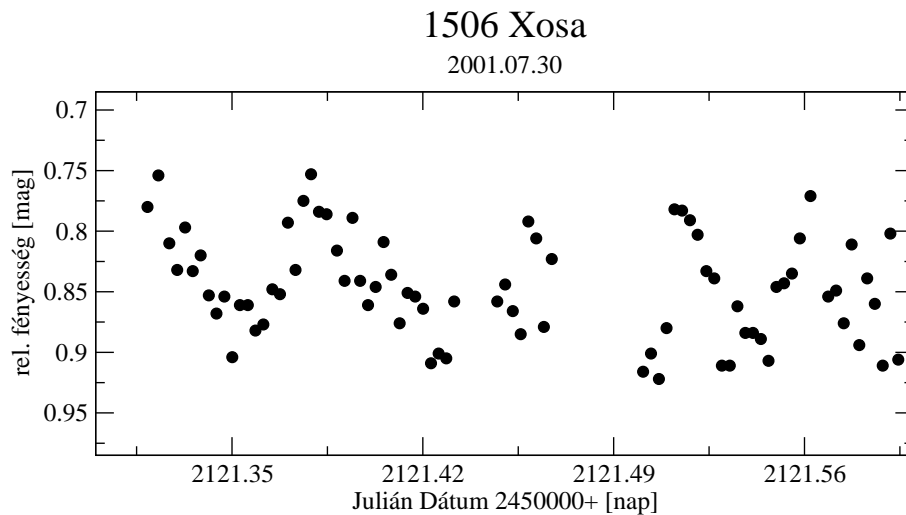


63. ábra. Az 1400 Tirela kompozit fénygörbéje.

1503 Kuopio kompozit fénygörbe



64. ábra. Az 1503 Kuopio kompozit fénygörbéje.



65. ábra. Az 1506 Xosa fénygörbéje.

6.3.15. 1506 Xosa

Az 1506 Xosa egyik éjszakán rögzített fénygörbéje a 65. ábrán tanulmányozható. A grafikon által mutatott R -szűrős fényváltozási amplitúdó $0,^m22$. Bár az ábrán vannak jelei a fényváltozási periodicitásnak, az adataim elégtelenek voltak a rotációs periódus kiszámításához. Robinson & Warner (2002) szintén megfigyelte ezt a kisbolygót, az általuk talált szinodikus periódus $5,^h9 \pm 0,^h01$ volt. Megfigyeléseik $0,^m28$ -s fényváltozási amplitúdót fedtek fel, ami egyezik az én eredményemmel. A megfigyelési zajjal terhelt adataim $5,^h9$ -t alkalmazva szinodikus periódusnak nem illeszkednek jól, amint az a 66. ábrán is látható.

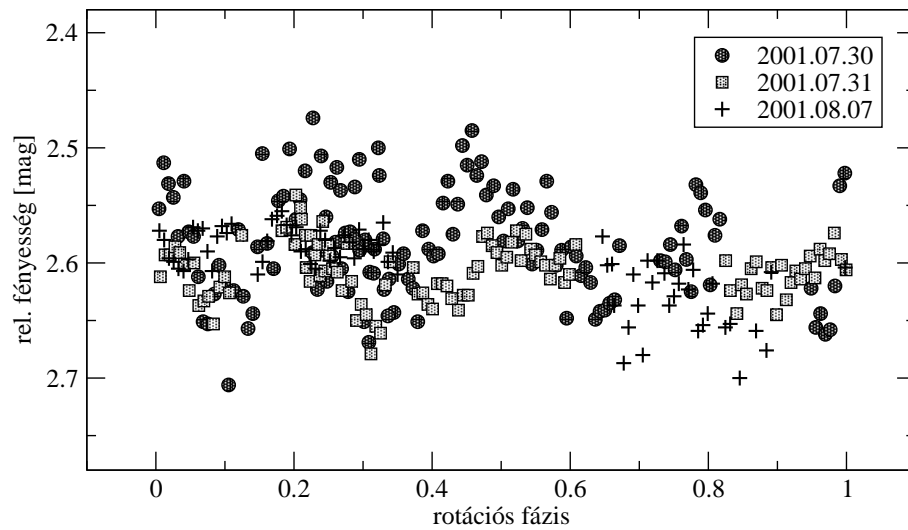
6.3.16. 1695 Walbeck

Az 1695 Walbeck fénygörbéje a 67. ábrán látható. A megfigyelések 3 éjszakáján nehezen értelmezhető fényváltozást detektáltam, aminek az amplitúdója meghaladta a $0,^m34$ -t. A relatíve nagy amplitúdó ellenére nem vezetett sikerre a fényváltozási periódus meghatározására tett kísérlet, mindazonáltal $5,^h3$ körüli érték lehet. Nincs más fénygörbe a szakirodalomban erre a kisbolygóra.

6.3.17. 2448 Sholokhov

A 2448 Sholokhov mindössze $3,^h6$ -t átívelő fénygörbéje folyamatosan növekvő fényességet mutat. A szűrőzetlen amplitúdó $0,^m25$ fölött van és a forgási periódus hosszabbnak tűnik 14 óránál, valószínűleg 20-24 órás tartományban lehet. Warner (2005) $10,065$ órát ad meg forgási periódusnak, amihez $0,^m63$ -os amplitúdó párosult.

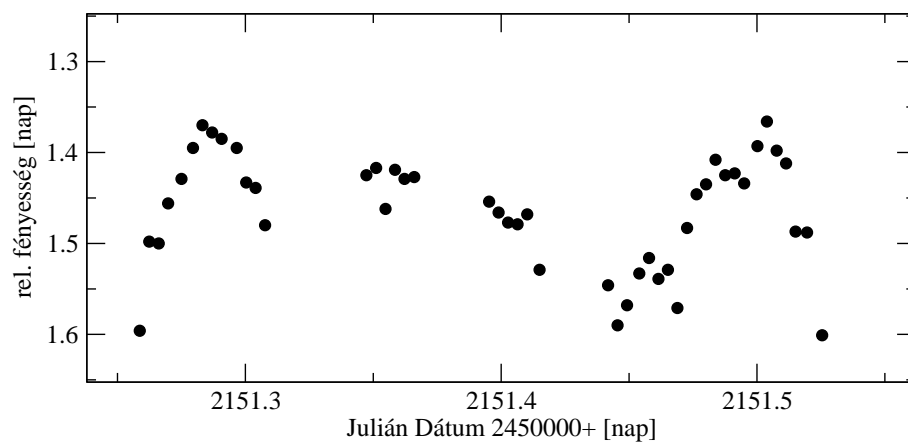
1506 Xosa kompozit fénygörbe



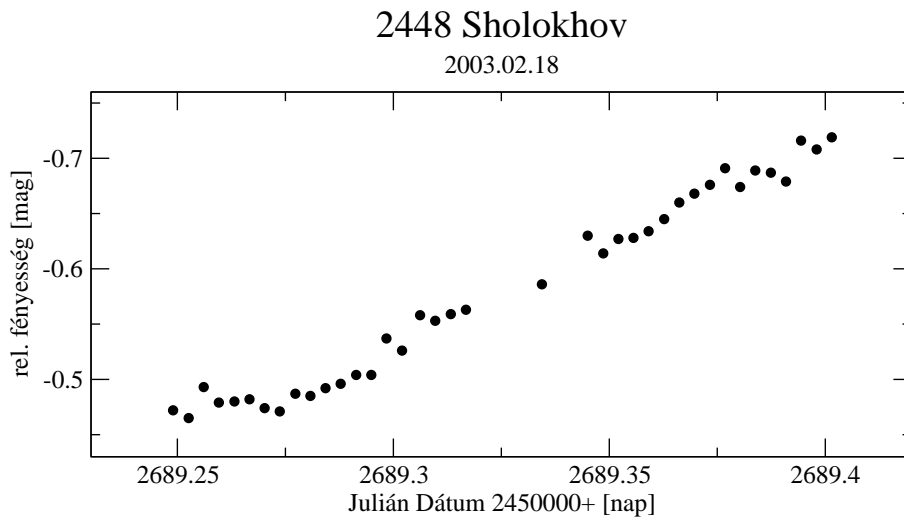
66. ábra. Az 1506 Xosa kompozit fénygörbéje.

1695 Walbeck

2001.08.29



67. ábra. Az 1695 Walbeck fénygörbéje.



68. ábra. A 2448 Sholokhov fénygörbéje.

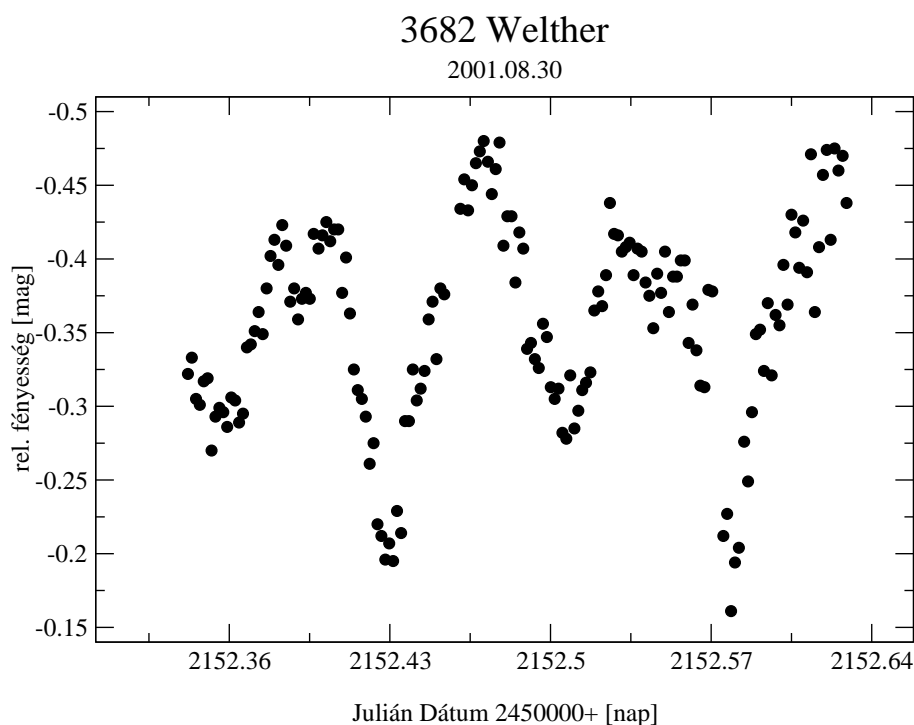
6.3.18. 3682 Welther

A 3682 Welther 2001. augusztus 30-án felvett fénygörbéje gyors fényességváltozást jelez. A 69. ábrán bemutatott görbe eltérő minimumú éles elhalványodásokat és egyenlőtlen maximumokat mutat. A megfigyelt szűrőzetlen amplitúdó 0^m35 volt. A fénygörbe alakja észrevehető változásokat mutatott már két napos intervallumon belüli megfigyelések esetében is, amint az látható is a mellékelt kompozit fénygörbén (70. ábra). A változás különösen nyilvánvaló az alsó panel 0,8 és 1,0 fázisai között.

Ez hasonló ahhoz, amit Stephens és mksai (2002) talált. Megfigyelési kampányuk során (Collaborative Asteroid Lightcurve Link, CALL)¹¹ adatokat vettek fel a kisbolygóra 2001 őszén 36 éjszakán. Megfigyelési kampányuk indításának oka az égitest által mutatott váratlan fényességváltozás volt, amit az aszteroida feltételezett kettősségének tulajdonítottak.

Mindazonáltal a hosszú időre kiterjedő adatok alapos tanulmányozása után a szerzők az intenzitás csökkenést (két másik gyanús eseménnyel együtt) a redukálási eljárás során fellépő mesterséges hatásnak tulajdonítják, például a kisbolygó mozgása során a látóirányban túlságosan közel került egy viszonylag fényes csillaghoz, ami valószínűleg befolyásolhatta az égi háttér szintjének meghatározását. Én is ellenőriztük ezt a lehetőséget a megfigyeléseim során és valóban, 2001. október 8-án volt egy 7 magnitúdós csillag 4 ívpercre az égitesttől, amikor a fénygörbe gyors fényesedést mutatott. Mivel a Konkoly Obszervatórium Schmidt-távcsövét használtam, lehetséges, hogy a távcső belsejében létrejövő reflexió okozhatta ezt a jelenséget, amelyet Stephens és mksai (2002) is tapasztaltak. Ennek ellenére nem zárhatjuk ki teljes bizonyossággal, hogy a fényváltozások valódiak és azt maga a kisbolygó okozza. A meghatározott szinodikus periódus $3^h597\pm0^h001$ és jó egyezésben van a Stephens és mksai (2002) által megadott $3^h5973\pm0^h0003$ értékkel.

¹¹<http://www.minorplanetobserver.com/astlc/default.htm>



69. ábra. A 3682 Welther fénygörbéje.

6.3.19. 5349 Paulharris

A rendkívül kedvezőtlen időjárási körülmények közepette a kisméretű 5349 Paulharris esetében felvett R -szűrős fotometriai adat csupán egy enyhe, monoton fényességnövekedést mutatott, melynek mértéke 0^m06 volt 0^h7 -n belül. Ha ez a fényváltozási tendencia valós, azt implicálja, hogy a periódus nagyobb 3 óránál. A szegényes és zajjal terhelt adatok miatt nem lehetett biztos forgási paramétereket meghatározni. Ez az első szakirodalomban publikált fénygörbe a 5349 Paulharris esetében.

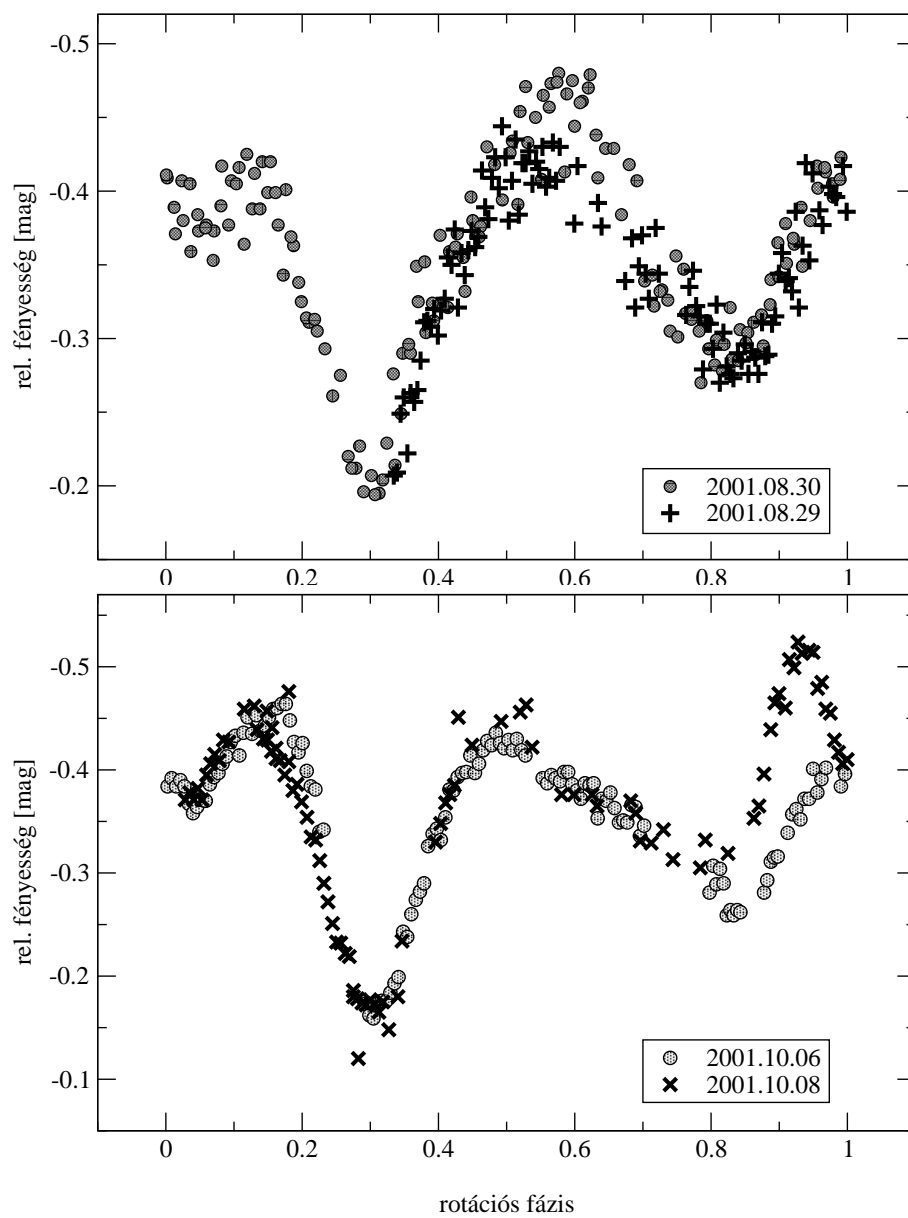
6.3.20. 5690 1992 EU

Ezt a kisbolygót 2000 őszén két éjszaka során figyeltem meg. Az ezekből származó fénygörbéket a 72. ábrán mutatom be. Az adatok sugallta amplitúdó 0^m4 , míg a forgási periódusra vonatkozóan nincs biztos konklúzió, ámbar a fénygörbe menetére alapozva 5 óra körül lehet. A 73. ábrán látható illesztést 6^h457 szinodikus periódus értékkel végeztem. Nincs más fénygörbe a szakirodalomban erre az égitestre.

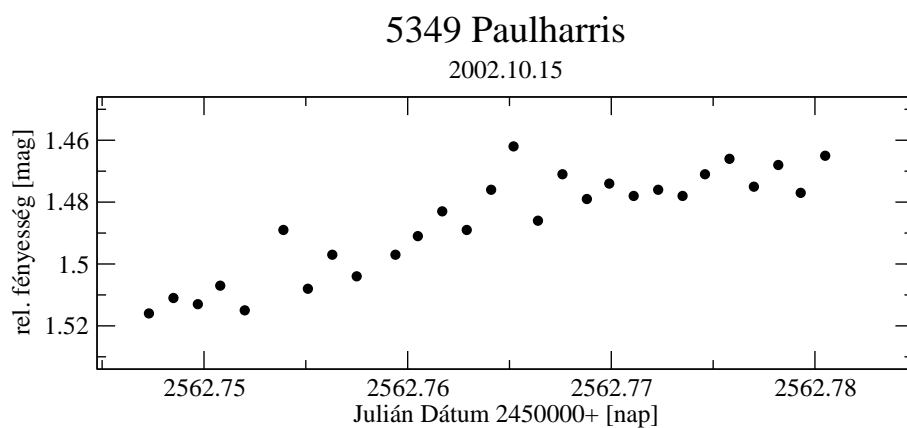
6.3.21. 6510 Tarry

A 74. ábrán bemutatott 6510 Tarry fénygörbéje két, eltérő magasságú maximumot mutat. Sajnos nem tudtam teljesen végigkövetni a második felszálló ágat, ezért lehetséges, hogy az amplitúdó nagyobb, mint a megfigyelt érték (0^m54 R szűrőben). A szinodikus periódus egészen közel lehet a 7 órához. Ez az első publikált fénygörbe ezen kisméretű

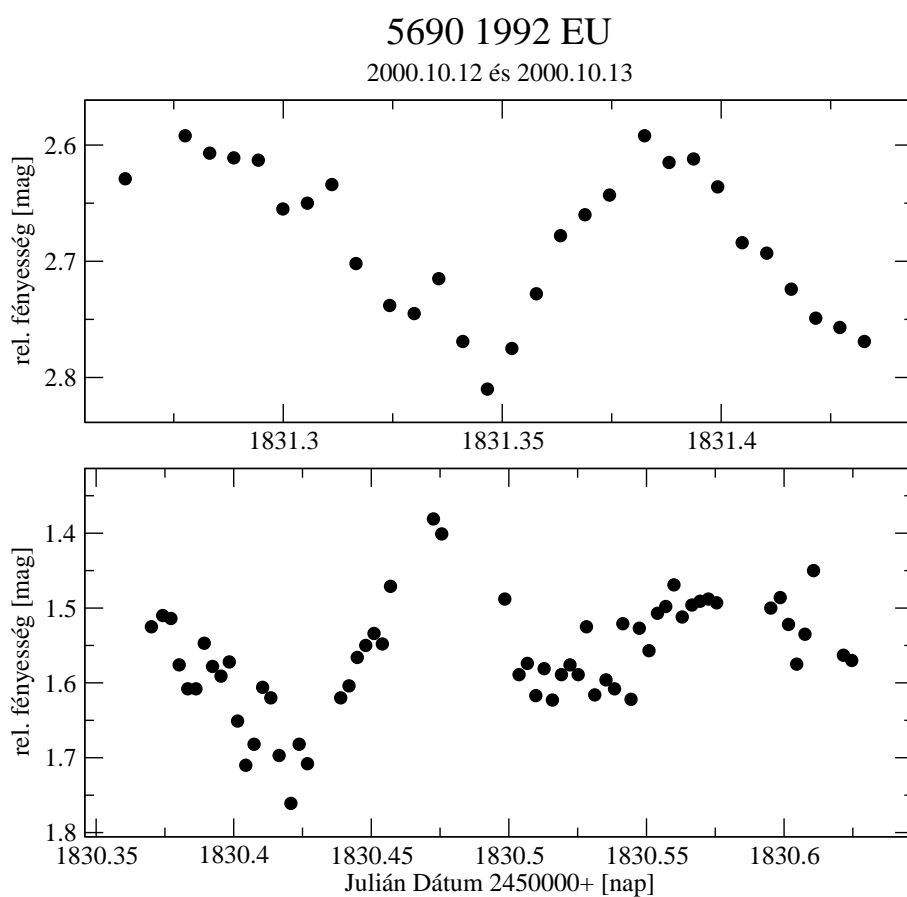
3682 Welther kompozit fénygörbe



70. ábra. A 3682 Welther kompozit fénygörbéje.

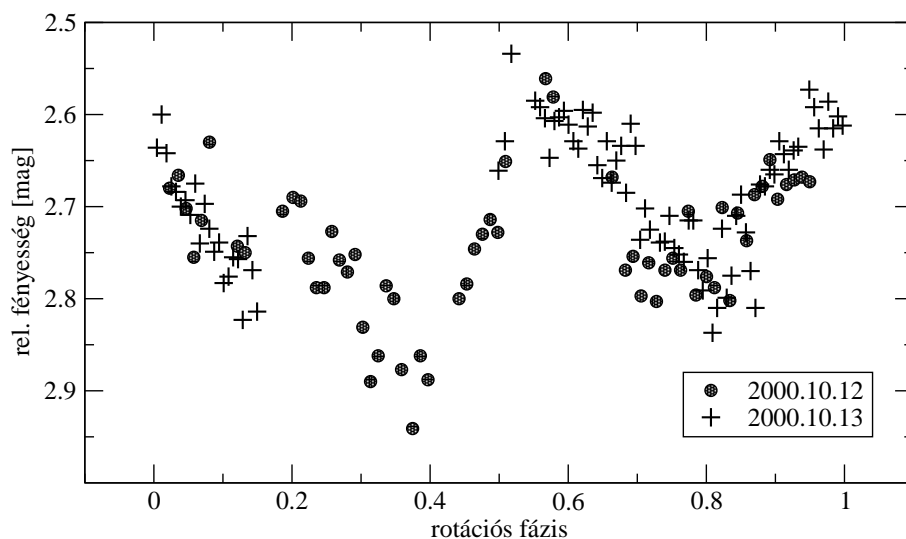


71. ábra. Az 5349 Paulharris fénygörbéje.



72. ábra. Az 5690 1992 EU fénygörbéje.

5690 1992 EU kompozit fénygörbe



73. ábra. Az 5690 1992 EU kompozit fénygörbéje.

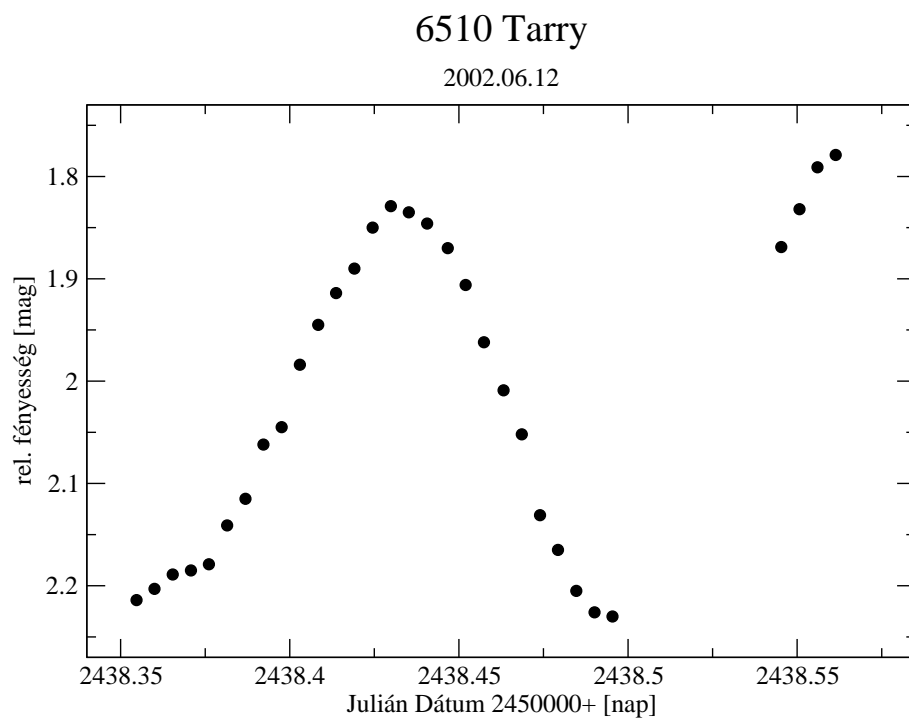
aszteroidára.

6.3.22. 7505 Furushu

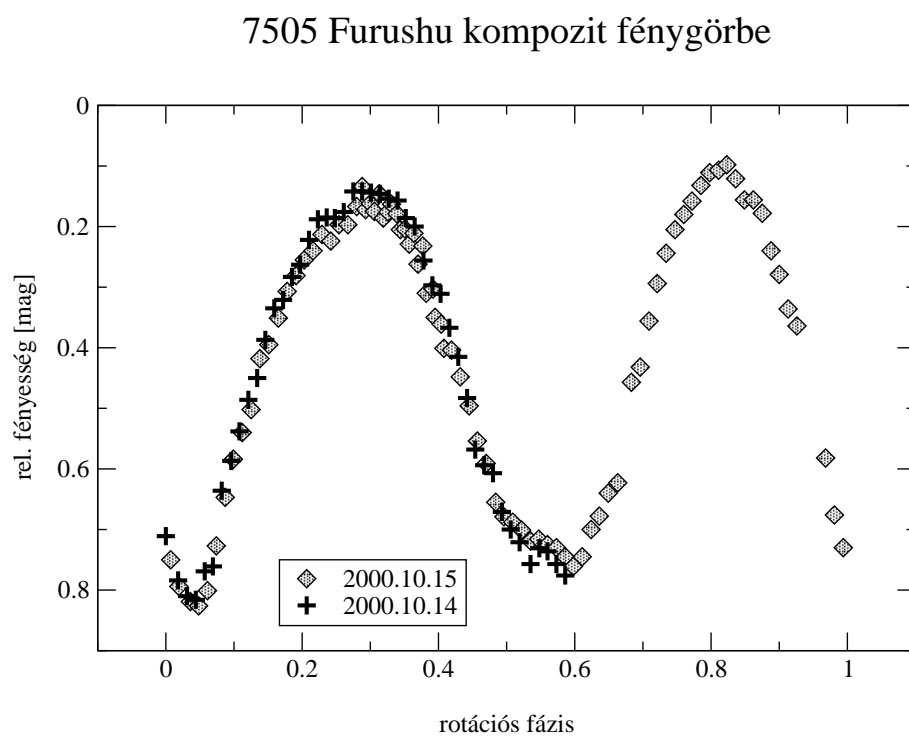
Ezt a kis égitestet még az ideiglenes elnevezésének (1997 AM₂) korszakában észleltem 2000 őszén. A 7505 Furushu számára készített kompozit fázis diagram a 75. ábrán látható. A kisbolygó nagy amplitúdójú (0^m75 -t meghaladó) fényváltozásokat mutatott. A számított szinodikus periódus $4^h14 \pm 0^h035$. Erre a kisbolygóra a szakirodalomban további adatok lelhetők fel a szinodikus periódusra és az amplitúdóra vonatkozóan (Stephens 2001). Az adataim teljesen konzisztensek az általuk meghatározott forgási periódussal ($4^h14 \pm 0^h02$), valamint a megfigyelt amplitúdó értékével (0^m74).

6.3.23. 11436 1969 QR

Ez a kisméretű és halvány aszteroida jól detektálható amplitúdójú (0^m27) fényváltozásokat produkált. A számított fázisdiagram a 76. ábrán látható. A szinodikus periódus $2^h65 \pm 0^h24$. Az eredményeket befolyásolta az a tény, hogy az expozíciós idők 3 és 5 perc voltak a kisbolygó halványsága miatt, ami a számított periódus jelentős hányada. Így valószínű, hogy az adataim enyhén alulmintavételezettek. Másrésről a rövid periódus és a hosszú expozíciós idő kombinációja az amplitúdó csökkenését okozhatja az expozíció alatti fényesség-átlagolás miatt. Nincs más fénygörbe a szakirodalomban erre a kisbolygóra vonatkozólag.

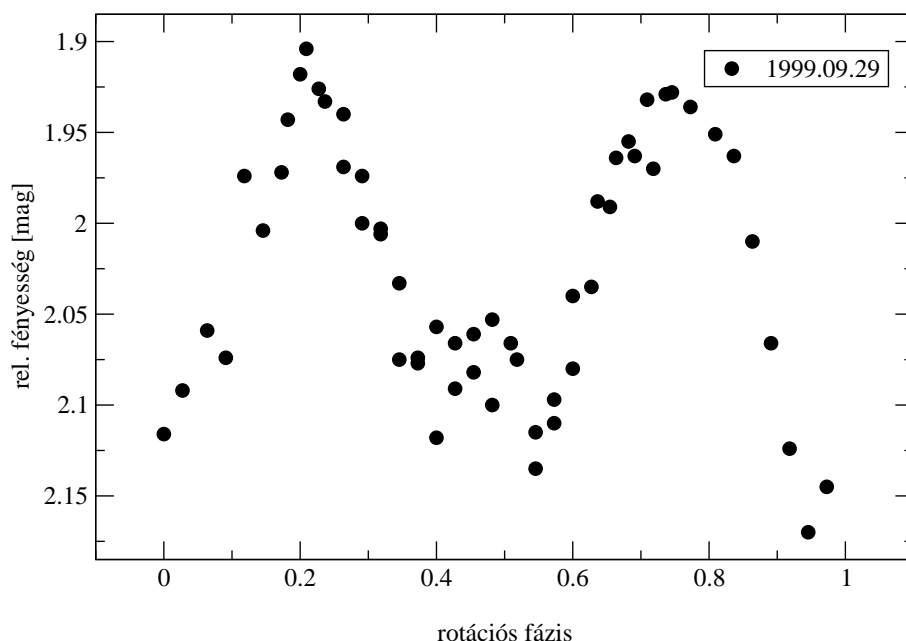


74. ábra. A 6510 Tarry fénygörbéje.



75. ábra. A 7505 Furushu kompozit fénygörbéje.

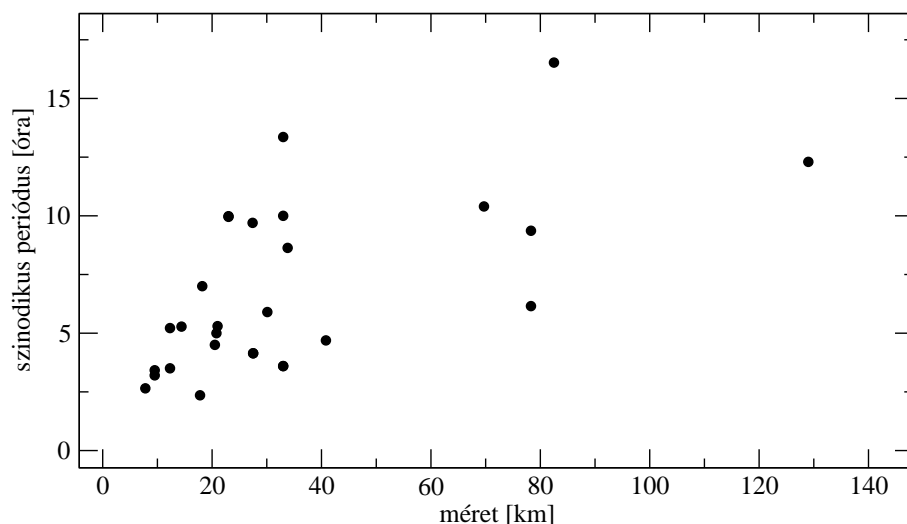
11436 1969 QR kompozit fénygörbe



76. ábra. Az 11436 1969 QR kompozit fénygörbéje.

6.4. Összefoglalás

Az előző oldalakon bemutatam 23 közepes és kisméretű főövbeli kisbolygó *R*-szűrős és szűrő nélkül felvett CCD fotometriai adatait. 8 objektumot korábban nem vizsgáltak. 17 égitest mutatott jól detektálható fényességváltozást. A kompozit fénygörbékéből 7 kisbolygónál meghatároztam a szinodikus forgási periódusokat. 3 égitest esetében megbecsültem a forgási periódust, a többi objektumra vonatkozóan csak a forgási paraméterek alsó korlátjainak megadása volt lehetséges. Két égitestnél (894 Erda, 3682 Welther) gyors fényességváltozást találtam, ami a sokkal lassabb, forgás általi változásokra rakódott. Ennek oka lehet az esetleges kettősség, azonban az itt bemutatott adatbázis mérete sokkal kisebb annál, ami ahhoz szükséges, hogy ilyen érdekes témakörben biztos következtetésre jussunk. A 77. ábrán látható (szinodikus periódusok az aszteroida méretének függvényében) grafikon alapján látható, hogy a kisebb égitestek rövidebb forgási periódussal rendelkeznek. A tanulmányozott kisbolygók fotometriai tulajdonságainak összefoglalása a 17. táblázatban látható.



77. ábra. A mért kisbolygók szinodikus periódusa a méret függvényében.

17. táblázat. A fotometriai tulajdonságok összegzése

Kisbolygó	Átmérő [km]	P_{syn} [h] (*)	ampl. (*)	P_{syn} [h]	ampl.	Ref.
469 Argentina	129 ± 3	12,3?	$0,^m14$	$3?, 8,63?$	$0,^m07$	(1)
531 Zerlina	$17,8 \pm 3,7$	$>3,84$	$>0,^m17$	2,352	$0,^m12$	(2)
				16,716	$0,^m41$	(3)
546 Herodias	$69,7 \pm 1,5$	10,4?	$0,^m07$			
549 Jessonda	$20,5 \pm 2,1$	–	$>0,^m15$	4,5	$0,^m1$	(4)
				$5,938 \pm 0,002$	$0,^m1$	(5)
697 Galilea	$82,5 \pm 1,7$	–	$<0,^m1$	$16,538 \pm 0,002$	$0,^m28$	(6)
756 Lilliana	$78,3 \pm 1,5$	$9,361 \pm 0,002$	$0,^m56$	6,151	$0,^m9$	(2)
894 Erda	$40,8 \pm 1,6$	–	$<0,^m1$	$4,69 \pm 0,01$	$0,^m08$	(7)
1026 Ingrid	14,4	5,3?	$>0,^m5$			
1108 Demeter	27,4	–	$0,^m15$	$9,70 \pm 0,01$	$0,^m17$	(7)
1170 Siva	$12,3 \pm 0,6$	3,5?	$<0,^m1$	5,215	$0,^m04$	(2)
1270 Datura	$9,5 \pm 0,5$	$3,4 \pm 0,3$	$0,^m61$	$3,2 \pm 0,1$	$0,^m41$	(8)
1286 Banachiewicz	$33,8 \pm 4,6$	$>1,2$	$>0,^m4$	8,631	$0,^m54$	(2)
1400 Tirela	33,0	$13,356 \pm 0,007$	$0,^m55$	$10,3 \pm 5,8$	$0,^m3$	(2)
1503 Kuopio	$23,0 \pm 1,7$	$9,98 \pm 0,03$	$0,^m77$	9,958	$0,^m69-1,^m01$	(2)
1506 Xosa	30,1	–	$0,^m22$	$5,9 \pm 0,01$	$0,^m28$	(9)
1695 Walbeck	$21,0 \pm 0,7$	5,3?	$0,^m34$			
2448 Sholokhov	$33,2 \pm 3,5$	>14	$>0,^m25$	$10,065 \pm 0,005$	$0,^m63$	(10)
3682 Welther	33,0	$3,597 \pm 0,001$	$0,^m35$	$3,5973 \pm 0,0003$	$0,^m31$	(11)
5349 Paulharris	19,0	>3	$>0,^m06$			
5690 1992 EU	20,8	5?	$>0,^m25$			
6510 Tarry	18,2	7?	$0,^m54$			
7505 Furushu	27,5	$4,14 \pm 0,035$	$0,^m75$	$4,14 \pm 0,02$	$0,^m74$	(12)
11436 1969 QR	7,8	$2,65 \pm 0,24$	$0,^m27$			

(*): Ezen értekezés. Referenciák: (1) Wang (2003) és Wang és mksai (2005); (2) Behrend web oldal; (3) Brinsfield (2008); (4) CALL web oldal; (5) Warner (2006); (6) Sheridan (2002); (7) Stephens (2002); (8) Wisniewski és mksai (1997); (9) Robinson & Warner (2002); (10) Warner (2005); (11) Stephens és mksai (2002); (12) Stephens (2001).

7. Összefoglalás és tézispontok

7.1. Tudományos háttér

- Annak ellenére, hogy a gömbhalmazok a modern asztrofizika kiváló tesztobjektumai az egyidőben, hasonló kémiai összetétel mellett született, rendkívül nagyszámú csillag populációjának köszönhetően, még mindig akad köztük olyan, amely alapos vizsgálata mindeztáig nem történt meg. Az NGC 362 eddig kevés átfogó vizsgálat tárgya volt, különös tekintettel a halmaz centrális vidékeire. Noha az első változócsillagokat már Sawyer 1931-es munkája is bemutatta, a legelső, teljességre törekvő változó-felmérést jelen értekezés tartalmazza. A legutóbbi vizsgálatok is csupán nagy határfényességű szín–fényesség-diagramok elkészítését célozták meg. A gömbhalmazbeli változócsillagok katalógusa is csupán 16 bejegyzést tartalmaz, amelyek nagy része távol van a halmaztól és bizonytalan paraméterűek.

A gömbhalmazok elméleti modelljei szerint az őket alkotó csillagok ugyanabból a gázfelhőből születtek hozzávetőlegesen ugyanabban az időben, ezért a halmazbeli csillagok fizikai tulajdonságai magát a halmazt reprezentálják. A legutóbbi időkben számos tapasztalati, kalibrált összefüggés látott napvilágot RR Lyrae típusú csillagokra, amelyek használatával meghatározható ezen változócsillagok fényessége, abszolút fényessége, vörösdése és más fizikai paramétere a fénygörbék alakjából. Értekezésemben bemutatom az NGC 362-ben lévő RR Lyrae csillagok analízisét, de emellett röviden kitérek más változócsillag-osztályokba tartozó égitestek tulajdonságaira is.

- A gömbhalmazok a Tejútrendszerünkben lévő legidősebb objektumok közé tartoznak, és csillagaik egyedülálló módon adnak betekintést a kozmikus időskálán zajló galaxisfejlődésbe. Ezek a halmazok a Tejútrendszer gravitációs potenciáljának érzékeny indikátorai, mivel a külső régiókban lévő csillagok radiális sebességeloszlását befolyásolja a Tejútrendszer környező gravitációs tere. Jelenlegi tudásunk szerint a gömbhalmazok jelentős dinamikai fejlődésen mentek keresztül. Ennek részei voltak olyan folyamatok is, amelyek a csillagok „elpárolgásáért” felelősek: árapályszerű kölcsönhatások a galaxissal és a kettest-relaxáció. Legtöbb esetben a halmaz nagymértékben elnyújtott pályán kering a galaxis centruma körül. A perigalaktikus pont közelében lépnek fel a legerősebb gravitációs hatások, amelyek eredménye az árapály-nyúlványok kialakulását előidéző árapály-lökés.

A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsovön üzembe helyezett AAOmega multiobjektum-spektrográf kiváló lehetőségeket kínál kb. 350-360 radiális sebesség mérésére egyetlen expozícióval. A nagy látómező (2 fok) lehetővé teszi olyan csillagok megfigyelését is, melyek az árapály-sugár többszörösére helyezkednek el a halmaztól.

Az $1\text{--}2\text{ km s}^{-1}$ sebességmérési pontossággal könnyedén beazonosíthatóak a halmaztól elszökött csillagok, amelyek azonos vagy nagyon hasonló radiális sebességek, mint maga a gazdahalmaz.

Értekezésem 4. fejezetében bemutatom a halmaztag csillagok radiális sebességének analízisét a megfigyelt öt halmazban tapasztalt rendszerszintű forgás tekintetében.

- A GW UMa a pulzáló változócsillagok nagy amplitúdójú δ Scuti csoportjába tartozik (az angol terminológia alapján High-amplitude δ Scuti star, HADS). Ezek az objektumok a fősorozathoz közeli, I-es populációs vagy elfejlődött II-es populációs csillagok lehetnek, ez utóbbiakat SX Phe változók néven is ismeri a szakirodalom. A fényváltozás oka radiális pulzáció rövid periódussal és viszonylag nagy amplitúdóval. Ezek a tulajdonságok teszik ezeket a csillagokat vonzó célpontokká kis és közepes méretű távcsövek számára. A mérések célja lehet evolúciós hatások kimutása, illetve a feltételezett kettős nagy amplitúdójú δ Scuti csillagok fizikai paramétereinek pontosítása a kettősség segítségével.

A δ Scuti típusú pulzáló csillagok egyik legfrissebb katalógusában számos objektum tartozik kettős vagy többszörös rendszerek közé. Ezek közül csupán néhány csillag tagja fedési kettős rendszereknek. A fedési kettős rendszerekbeli δ Scuti típusú pulzáló komponensek az asztroszeizmológia kíváncsú célpontjai, mivel segítségével lehetőség nyílik a pulzációs módusok azonosítására az alapvető fizikai paraméterek meghatározásán keresztül. Egy másik érdekes lehetőség az árapályhatások tanulmányozása az oszcillációkra.

Értekezésem 5. fejezetében bemutatom a fedési kettős SZ Herculisra és a GW UMa-ra (nagy amplitúdójú δ Scuti) vonatkozó eredményeimet.

- Több mint 200 évvel az első főövbeli kisbolygó, az 1 Ceres felfedezése óta nagy mértékben automatizált és kellően érzékeny felmérések korábban elképzelhetetlen mennyiségben ontják a frissen felfedezett kisbolygókat. A folyamat jelenleg is egyre gyorsul, és a megfigyelések a leghalványabb, így legkisebb kisbolygók birodalmát ostromolják. A mások oldalról viszont a megfigyelt objektumok nagy száma erős korlátokat jelent ezeknek az égitestek esetében azok fizikai tulajdonságainak meghatározásában és megértésében. Ezek az újonnan felfedezett kisbolygók minden különösebb figyelem felkeltése nélkül kerülnek bele az elektronikus katalógusokba: a naprendszerbeli égitestek egyre nagyobb hányadát ismerjük meg anélkül, hogy a megfigyelhető tulajdonságaikról (pl. forgás, alak) információt szereznenk. A fentebb említett tényekből kifolyólag egy új megfigyelési terület alakult ki, amelyhez egy kisebb főiskolai/egyetemi obszervatórium, vagy akár még egy megfelelő eszközökkel rendelkező, jól felszerelt amatőr csillagász is jelentős hozzájárulást tud nyújtani: a közepesen halvány és kisméretű aszteroidák felfedezést

követő fotometriai megfigyelésének területe.

Értekezésem 6. fejezetében 23 kisbolygó esetében végzett, új fotometriai megfigyeléseim eredményeit mutatom be.

7.2. Kutatási módszerek

Munkám során számos obszervatórium műszerét használtam. A gömbhalmaz-fotometriai vizsgálatokat az ausztráliai Siding Spring Obszervatóriumban található, 1 méteres távcsővel végeztem, amely az Ausztrál Nemzeti Egyetem (ANU) műszere. A kisbolygókra, illetve változócsillagokra vonatkozó fotometriai adatokat a Szegedi Csillagvizsgáló 0,4 méteres Cassegrain-távcsővével és a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete Piszkestetői Obszervatóriumában található 60/90/180 cm Schmidt-távcsővel rögzítettem.

Spektroszkópiai úton meghatároztam öt, az NGC 362 jelű gömbhalmazban lévő, RR Lyrae típusú csillag radiális sebességeit is a pulzációs fázis során. Ehhez az ANU 2,3 méteres Advanced Technology Telescope-ján lévő Double Beam Spectrograph nevű műszert vettem igénybe.

A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsövön üzembe helyezett AAOmega multiobjektum-spektrográffal összességében több mint 10500 csillag spektrumát rögzítettük. A megfigyelés során kapott nyers spektrumok redukálása a standard 2dF adatfeldolgozó csomaggal történt.

A fotometriai adatok feldolgozása standard IRAF rutinokkal történt. A gömbhalmaz képeinek kiértékelésére egyrészt PSF-fotometriát használtam (az IRAF daophot csomagja), másrészt képkivonási technikát alkalmaztam. A standard fotometriai kalibrációkhoz különböző Landolt-mezőket észleltem. A standard transzformációs koefﬁcienseket az IRAF *photcal* taszkja segítségével határoztam meg. A radiális sebességeket keresztkorrelációs módszerrel számítottam ki.

A PSF-illesztésből és a képkivonási eljárásból származó fénygörbét több módszerrel is vizsgáltam lehetséges fényváltozási periódusok detektálása érdekében. Ehhez a következő eljárásokat használtam: Fourier-analízis, fázisdiszperziós módszer, fűzérhossz-minimalizálás.

Munkám során nagy segítséget jelentettek az általam írt C nyelvű programok és shell scriptek.

7.3. Tézispontok

1. PSF- és képkivonásos fotometriát alkalmazva az általam rögzített CCD-felvételeken 45 RR Lyrae változócsillagot találtam az NGC 362 látómezejében, ezek közül 28 új felfedezés. A képkivonásos technika során eredményül kapott fluxusgörbét egy

egyszerű, általunk kidolgozott eljárással átkonvertáltam magnitúdógörbéké. Ez lehetővé tette az RR Lyrae csillagok számára a szakirodalomban létező empirikus fénygörbealak és fizikai paraméterek közti kalibrációk használatát. Ezek segítségével meghatároztam 16 RR Lyrae csillagra a fémességet, hőmérsékletet, abszolút fényességet, luminozitást, vörösödést, távolságot.

Az RR Lyrae csillagok között - mind az RRab, mind az RRc altípus esetében - viszonylag nagy arányban találtam modulált fénygörbét, azaz a Blazskó-effektus jelenlétét. Az NGC 362 ezért kiváló célpontja lehet a Blazskó-effektus vizsgálatára kémiaiilag homogén környezetben.

Izokrón illesztéssel szintén meghatároztam a halmaz fő paramétereit. Mind az RR Lyrae csillagok, mind a szín-fényesség-diagram analízise konzisztens fizikai paraméterekre vezetett, melyek jó egyezésben vannak a szakirodalomban fellelhető értékekkel: a $[Fe/H]$ értéke $-1,34$, a halmaz távolsága $8,5$ kpc, míg a kora 11 milliárd évnél adódott.

Nagyszámú, egyéb osztályba tartozó változócsillagokat fedeztem fel: cefeidákat, a Kis Magellán-felhőben lévő, hosszú periódusú változókat, fedési kettősöket, a galaktikus mezőben lévő, δ Sct típusú pulzáló csillagokat (Székely és mksai, 2005; Székely és mksai, 2006a; Székely és mksai, 2006b; Székely és mksai, 2007).

2. Közel 10500 csillagra vettünk fel közepes felbontású, közeli infravörös spektrumokat öt, a déli égbolton található gömbhalmazban és azok környezetében a 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsovön a közelmúltban üzembe helyezett, AAOmega nevű multiobjektum-spektroszkóppal. A kiválasztott gömbhalmazok a következők voltak: 47 Tuc, M12, M30, M55 és NGC 288. A radiális sebesség-mérés pontossága keresztkorrelációs módszerrel $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ körüli, emellett szintetikus modell-spektrumok illesztésével minden csillagra megbecsültük a fémességet, az effektív hőmérsékletet, a felszíni gravitációt és a forgási sebességet. A sebességtérképek és a halmaztag csillagokra vonatkozó sebesség diszperziók általam végzett analízise felfedte négy halmaz esetében a rendszer forgását (Kiss és mksai, 2007a; Székely és mksai, 2007b).
3. A GW UMa csillagra vonatkozó analízisem megmutatta, hogy a csillag nagy valószínűséggel monopériodikus. Az R_{21} Fourier amplitúdó paraméter a nagy amplitúdójú δ Scuti (HADS) objektumok közé helyezi a csillagot, ezzel kizártam az első vagy második felhangú RR Lyrae pulzáció lehetőségét. Ezen kívül 8 új maximumidőpontot határoztam meg. Az O–C értékek alapján lehetséges, hogy egy enyhe periódus változás történt az elmúlt évtizedben (Derekas és mksai, 2002; Derekas és mksai, 2003a; Derekas és mksai, 2005).
4. Az Algol-típusú SZ Herculis fedési kettősre vonatkozó új, *VRI* szűrős, CCD-foto-

metriai méréseim alapján 4 új epochát számítottam ki az elsődleges minimumok esetében. Nem detektáltam rövid időskálájú fényváltozást, ami pulzáló komponens(ek) jelenlétére utalna. Az O–C diagram alapján az SZ Her esetleg egy harmadik komponenssel is rendelkezik (Székely, 2003).

5. Elvégeztem 23 közepes és kisméretű főövbeli kisbolygó *R*-szűrős és szűrő nélkül felvett CCD-fotometriai vizsgálatát. Ezek közül 8 objektumra korábban nem volt szakirodalmi adat. 17 égitest mutatott jól detektálhatófényesség változást. A kompozit fénygörbékből 7 kisbolygó esetében meghatároztam a szinodikus forgási periódusokat. 3 égitest esetében megbecsültem a forgási periódust, a többi objektumra vonatkozóan csak a forgási paraméterek alsó korlátjainak megadása volt lehetséges. Két esetben (894 Erda, 3682 Welther) gyors fényességváltozást találtam, ami a sokkal lassabb, forgás általi változásokra rakódott. Ennek oka lehet az esetleges kettősség (Székely, 2002; Székely és mksai, 2005).

8. A dolgozat angol nyelvű összefoglalása és tézispontok

8.1. Scientific background

- Although globular clusters play an important role in testing stellar evolutionary models, one can still find surprisingly bright and neglected clusters, especially in the southern hemisphere. NGC 362 is such an object, having been target of relatively few studies and so far lacking any comprehensive search for variable stars, particularly in the central regions of the cluster. Apart from the pioneering work of Sawyer, which contained data for fourteen variable stars, recent works mainly aimed at obtaining deep Color-Magnitude Diagrams. In the catalog of globular cluster variables there are only 16 stars, of which many are far from the cluster center and have ambiguous properties.

Models for globular clusters suggest that all the member stars were formed from the same gas cloud at approximately the same time. Hence physical parameters of member stars are representative of the cluster itself. Recently, many empirical relations have been calibrated for RR Lyrae stars, which can be used to determine metallicities, absolute magnitudes, reddenings and other physical parameters from the light curve shapes of these variables. In my PhD thesis I present an analysis of RR Lyrae stars in NGC 362 and briefly discuss properties of variable stars of other types.

- Globular clusters are among the oldest objects in our Galaxy and their stars provide unique information on Galactic evolution through cosmic times. These clusters are sensitive indicators of the Galactic gravitational potential because the velocity distribution of their stars is affected by the ambient field of the Milky Way. They are believed to have undergone substantial dynamical evolution, which is affected by processes responsible for the „evaporation” of stars: tidal interaction with the Galaxy and two-body relaxation. When moving around the Galactic center, a cluster experiences strong gravitational interactions which can result in tidal shocks and lead to the formation of tidal tails.

AAOmega, a multi-object spectrograph on the 3.9 meter Anglo-Australian Telescope provides an excellent opportunity to measure up to 350-360 radial velocities with a single exposure. Due to its large field of view (2 degrees) it can observe stars which are located far from the cluster in the plane of the sky. With a velocimetric accuracy of about $1\text{-}2\text{ km s}^{-1}$, one can easily identify escaped stars which have the same or very similar radial velocities as the host cluster.

In the 4th section of my thesis I present an analysis of radial velocities of cluster member stars in terms of systemic rotation for five southern globular clusters. A

detailed investigation of their possible tidal tails has been reported by Kiss et al. (2007).

- High-amplitude δ Scuti stars are either Pop. I stars close to the main sequence or evolved Pop. II stars (these are also known as SX Phe variables) with very characteristic light variations caused by radial pulsations. Owing to their short periods and high amplitudes, these stars are very good targets for small and moderate-sized telescopes, so that interesting astrophysical phenomena can be easily studied even with modest instrumentation.

In a recent comprehensive catalogue of δ Scuti type pulsating stars there are many objects belonging to binary or multiple stellar systems. Of those, only a fraction of stars are components of eclipsing binaries. These stars are desired compound for asteroseismology in order to identify pulsation modes through determination of fundamental physical parameters. Another interesting possibility is the study of tidal effects on oscillation.

The 5th section of my thesis contains the analysis of two variable stars: GW UMa is a high-amplitude δ Scuti star, and SZ Her is an Algol-type eclipsing binary, respectively.

- More than 200 years after the discovery of the first main-belt asteroid, 1 Ceres, highly automatized and sensitive surveys yielded an unimaginable number of newly discovered minor planets. The process is still accelerating, and the observations arrived to the realm of the faintest, thus the smallest objects. On the other hand, the huge number of objects causes a strong limitation in determining and understanding their physical properties. The overwhelming majority of these newly found objects goes without further notice and a large body of solar system objects is accumulating without known observable properties (e.g. rotation, shape). That is why a new field has emerged, to which even well-equipped amateur astronomers or small college observatories can make significant contribution: follow-up photometric observations of moderately faint and small asteroids.

In Section 6 of my thesis I present the study of the light curves of 23 minor planets.

8.2. Research methods

During my work I used the equipments of several observatories. Globular cluster photometric data were obtained with the use of the 1m ANU telescope at Siding Spring Observatory, Australia. Data points of variable stars and minor planets were acquired with the 0.4m Cassegrain-telescope of the Szeged Observatory and with the 60/90/180 cm Schmidt-telescope of the Konkoly Observatory.

For 5 RR Lyrae stars in NGC 362 I measured radial velocities from optical spectra taken with the 2.3m ANU telescope and the Double Beam Spectrograph in Siding Spring.

With AAOmega, a multi-object spectrograph on the 3.9 meter Anglo-Australian Telescope we took spectra for more than 10,500 stars. The spectra were reduced with the standard 2dF data processing pipeline.

Photometric data were processed with standard IRAF routines. Globular cluster images were analysed both with PSF photometry and image subtraction photometry. For standard photometric calibrations we observed selected equatorial Landolt-fields, then the transformation coefficients were determined with the IRAF task *photcal*. RR Lyrae radial velocities were measured with cross-correlation. Light curves from PSF-fitting and image subtraction were analysed for finding periods. For this, I applied a combination of Fourier analysis, phase dispersion minimization and string-length minimization.

During my work I heavily relied on self-developed C and shell-script codes.

8.3. Results

1. NGC 362: Using PSF and image subtraction photometry I have found 45 RR Lyr variables in the field of the cluster, of which 28 are new discoveries. I have converted flux curves into magnitudes for all RR Lyrae stars with a self-developed simple method, which allowed me to use empirical light curve shape vs. physical parameter calibrations. With these, I have determined metallicities, absolute magnitudes, reddenings and other physical parameters for 16 RR Lyraes.

I have found a rather high-percentage of modulated RR Lyr light curves, i.e. the Blazhko effect, both for RRab and RRC-type stars. NGC 362 could be an excellent target for studying the Blazhko effect in a chemically homogeneous environment.

From isochrone fitting I have also determined the main parameters of the cluster. Both the RR Lyraes and the color-magnitude diagram result in a consistent set of physical parameters, which are in good agreement with the values found in the literature. The newly determined parameters are the following: $[Fe/H]$ equals -1.34 , the distance of the cluster is 8.5 kpc, and the age is $11 \cdot 10^9$ years.

I have also discovered variable stars of other types, including Cepheids and long-period variables in the Small Magellanic Cloud, eclipsing binaries and δ Sct-type pulsating stars in the galactic field (Székely et al., 2005; Székely et al., 2006a; Székely et al., 2006b; Székely et al., 2007).

2. For 10,500 stars in and around five southern globular clusters using the recently commissioned multiobject-spectrograph AAOmega on the 3.9m AAT we have obtained medium-resolution near-infrared spectra. The targets were 47 Tuc, M12, M30, M55 and NGC 288. We have measured radial velocities to $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ with

the cross correlation method and estimated metallicity, effective temperature, surface gravity and rotational velocity for each star by fitting synthetic model spectra. My analysis of the velocity maps and velocity dispersion of member stars revealed systemic rotation in four of the target clusters (Kiss et al., 2007a; Székely et al., 2007b).

3. I have presented the first observations of GW UMa since its discovery by the Hipparcos satellite. Based on the R_{21} Fourier amplitude parameter GW UMa is right on the border between RR Lyrae and HADS stars. The stability of the light curve shape excludes the possibility of a relatively high-amplitude secondary period, thus I have excluded the possibility of first- or second-overtone RR Lyrae pulsation. Eight new times of maximum were determined. Judged from the O–C diagram it is possible that the star exhibited a slight period change in the last decade (Derekas et al., 2002; Derekas et al., 2003a; Derekas et al., 2005).
4. Using *VRI* filtered CCD photometry dataset obtained during 9 nights four new epochs of primary minimum were calculated for Algol-type SZ Herculis. The Fourier analysis of the lightcurves revealed there is no pulsating component in the system of SZ Her. Deduced from O–C diagram SZ Her may have a third component (Székely, 2003).
5. I have presented CCD R-filtered and unfiltered photometric data for 23 small and intermediate-sized main-belt asteroids. 8 of them were not investigated previously. 17 minor planets exhibited detectable light variations. With composite light curves, I have derived synodical periods for seven objects. In case of three minor planets I have estimated the rotational period. For the rest only lower limits of rotational parameters can be concluded. In two cases (894 Erda, 3682 Welther), I have found rapid brightness changes superimposed on the much slower rotationally induced variations, which might be attributed to possible binarity (Székely, 2002; Székely et al., 2005).

9. Publikációk

9.1. Az értekezéshez felhasznált saját publikációk

Az alábbiakban áttekintés céljából felsorolásszerűen megadom az értekezéshez felhasznált saját publikációkat (referált cikkeket és konferenciakiadványokat is).

Referált angol nyelvű szakcikk

Hivatkozások

- [1] Derekas, A.; Kiss, L. L.; **Székely, P.**; Alfaro, E. J.; Csák, B.; Mészáros, Sz.; Rodríguez, E.; Rolland, A.; Sárneczky, K.; Szabó, Gy. M.; Szatmáry, K.; Váradi, M.; Kiss, Cs.:

A photometric monitoring of bright high-amplitude δ Scuti stars. II. Period updates for seven stars

Astronomy and Astrophysics, v. 402, p. 733-743. (2003a)

- [2] **Székely, P.**:

A CCD Photometric Search for Pulsations in SZ Her

Information Bulletin on Variable Stars, 5467, 1. (2003)

- [3] **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Szabó, Gy. M.; Sárneczky, K.; Csák, B.; Váradi, M.; Mészáros, Sz.:

CCD photometry of 23 minor planets

Planetary and Space Science, Volume 53, Issue 9, p. 925-936. (2005)

- [4] **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Jackson, R.; Derekas, A.; Csák, B.; Szatmáry, K.:

RR Lyrae stars in the southern globular cluster NGC 362

Astronomy and Astrophysics, Volume 463, Issue 2, February IV 2007, pp. 589-600. (2007)

- [5] Kiss, L. L.; **Székely, P.**; Bedding, T. R.; Bakos, G. Á.; Lewis, G. F.:

A Wide-Field Kinematic Survey for Tidal Tails around Five Globular Clusters

The Astrophysical Journal, Volume 659, Issue 2, pp. L129-L132. (2007a)

- [6] **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Szatmáry, K.; Csák, B.; Bakos, G. Á.; Bedding, T. R.:

Radial velocities of five globular clusters obtained with AAOmega

- [7] **Székely, P.**; Jackson, R.; Kiss, L. L.; Szatmáry, K.:

A survey of variable stars in the globular cluster NGC 362

Proceedings of the 4th Workshop of Young Researchers in Astronomy & Astrophysics Budapest, Hungary, 11-13 January, 2006. Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU) Edited by E. Forgács-Dajka, ISBN 963 463 557, ISSN 0238-2423, Vol. 17., p. 127 (2006a)

- [8] **Székely, P.**:

A comprehensive survey of variable stars in the globular cluster NGC 362

Astrophysics of Variable Stars, ASP Conference Series, Vol. 999, 349, 343 (2006b)

- [9] Derekas, A.; Kiss, L. L.; Csák, B.; Griffin, J.; Lindstrom, C.; Mészáros, Sz.; **Székely, P.**; Ashley, M. C. B.; Bedding, T. R.:

Binarity and multiperiodicity in high-amplitude δ Scuti stars

Workshop on Stellar Pulsation and Evolution, Rome, June 2005

Memorie della Societa' Astronomica Italiana, Vol. 77, 517

- [10] **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Csák, B.; Derekas, A.; Bedding, T. R.; Szatmáry, K.:

A comprehensive survey of variable stars in the globular cluster NGC 362

Workshop on Stellar Pulsation and Evolution, Rome, June 2005

Memorie della Societa' Astronomica Italiana, Vol. 77, 346

- [11] **Székely, P.**: Photometry of selected asteroids

Proc. of "Meeting on Asteroids And Comets in Europe", Visnjan, Croatia, 17–19 May 2002

- [12] Derekas, A., **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Szatmáry, K.; Mészáros, Sz.:

Photometric survey of the brightest northern high amplitude δ Scuti stars

Proc. of "International Meeting on Variable Stars", Bourbon-Lancy, France, August 2002; Ed. J. Minois, Burillier Publ. (Vannes), p. 159-164

9.2. Egyéb, az értekezéshez szorosan nem kötődő publikációk

Az alábbiakban áttekintés céljából felsorolásszerűen megadom az értekezéshez szorosan nem kötődő, de szakmai szempontból említésre érdemes saját publikációkat (a referált cikkeket és a konferenciakiadványokat is).

Referált angol nyelvű szakcikk

Hivatkozások

- [1] Derekas, A.; Kiss, L. L.; Bedding, T. R.; Ashley, M. C. B.; Csák, B.; Danos, A.; Fernandez, J. M.; Fűrész, G.; Mészáros, Sz.; Szabó, Gy. M.; Szakáts, R.; **Székely, P.**; Szatmáry, K.:

Binarity and multiperiodicity in high-amplitude δ Scuti stars

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 394, Issue 2, pp. 995-1008. (2009)

- [2] Pastorello, A.; Mazzali, P. A.; Pignata, G.; Benetti, S.; Cappellaro, E.; Filippenko, A. V.; Li, W.; Meikle, W. P. S.; Arkharov, A. A.; Blanc, G.; Bufano, F.; Derekas, A.; Dolci, M.; Elias-Rosa, N.; Foley, R. J.; Ganeshalingam, M.; Harutyunyan, A.; Kiss, L. L.; Kotak, R.; Larionov, V. M.; Lucey, J. R.; Napoleone, N.; Navasardyan, H.; Patat, F.; Rich, J.; Ryder, S. D.; Salvo, M.; Schmidt, B. P.; Stanishev, V.; **Székely, P.**; Taubenberger, S.; Temporin, S.; Turatto, M.; Hillebrandt, W.:

ESC and KAIT observations of the transitional Type Ia SN 2004eo

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 377, Issue 4, pp. 1531-1552. (2007)

- [3] Acosta-Pulido, J. A.; Kun, M.; Ábrahám, P.; Kóspál, Á.; Csizmadia, Sz.; Kiss, L. L.; Moór, A.; Szabados, L.; Benkő, J. M.; Delgado, R. Barrena; Charcos-Llorens, M.; Eredics, M.; Kiss, Z. T.; Manchado, A.; Rácz, M.; Almeida, C. Ramos; **Székely, P.**; Vidal-Núñez, M. J.:

The 2004-2006 Outburst and Environment of V1647 Ori

The Astronomical Journal, Volume 133, Issue 5, pp. 2020-2036. (2007)

- [4] Sárneczky, K.; **Székely, P.**; Kiss, L. L.; Szabó, Gy.; Csák, B.:

Minor Planet Observations [461 University of Szeged, Piszkesteto Stn. (Konkoly)

Minor Planet Circular 58768, 9 (2007)

- [5] Lindstrom, C.; Griffin, J.; Kiss, L. L.; Uemura, M.; Derekas, A., Mészáros, Sz.; **Székely, P.:**
New clues on outburst mechanisms and improved spectroscopic elements of the black-hole binary V4641 Sagittarii
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 363, 882 (2005)
- [6] Uemura, M.; Mennickent, R.; Stubbings, R.; Bolt, G.; Monard, B.; Cook, L. M.; Williams, P.; Ishioka, R.; Imada, A.; Kato, T.; Nogami, D.; Starkey, D.; Maehara, H.; Nakajima, K.; Mészáros, Sz.; **Székely, P.;** Kiss, L. L.; Lindstrom, C.; Griffin, J.:
Outburst of a Black Hole X-ray Binary V4641 Sgr in 2004 July
Information Bulletin on Variable Stars No. 5626. (2005)
- [7] Sárneczky, K.; Mészáros, S.; Sipőcz, B.; Derekas, A.; Csák, B.; **Székely, P.;** Gere, B.; Makai, Z.; Fűrész, G.:
Minor Planet Observations 461 Szeged University, Piszkesteto Stn. (Konkoly)
Minor Planet Circular 50616, 2 (2004)
- [8] Szabó, Gy. M.; Sárneczky, K.; Vinkó, J.; Csák, B.; Mészáros, Sz.; **Székely, P.;** Bebesi, Zs.:
Photometry of SN 2002bo with template image subtraction
Astronomy and Astrophysics, v. 408, p. 915-919 (2003)
- [9] Kiss, L. L.; Derekas, A.; Mészáros, Sz.; **Székely, P.:**
A photometric monitoring of bright high-amplitude δ Scuti stars
I. The double-mode pulsation of V567 Ophiuchi
Astronomy and Astrophysics, v. 394, p. 943-948 (2002)
- [10] Csák, B.; Kiss, L. L.; Kovács, D.; Mészáros, Sz.; Sárneczky, K.; **Székely, P.:**
Two new contact binary stars
Information Bulletin on Variable Stars No. 5049. (2001)
Posztterek, konferencia kiadványok:
- [11] Szabó, Gy. M.; Fűrész, G.; **Székely, P.;** Szentgyorgyi, A.:
Kinematics and variable stars in NGC 1907 and 1912
Astrophysics of Variable Stars, ASP Conference Series, Vol. 999, 349, 339 (2006)

10. Irodalomjegyzék

Hivatkozások

- [1] Alard, C., 2000, A&AS, 144, 363
- [2] Alard, C., Lupton, R. H., 1998, ApJ, 503, 325
- [3] Alcaïno, G., 1976, A&AS, 26, 359
- [4] Alves, D.R., Rejkuba, M., Minniti, D., és mksai, 2002, ApJ, 573, 51
- [5] Anderson, J., King, I. R., 2003, AJ, 126, 772
- [6] Angeli, C. A., Guimarães, T. A., Lazzaro, D., és mksai, 2001, AJ, 121, 2245
- [7] Belokurov, V., Evans, N. W., Irwin, M. J., és mksai, 2006, ApJ, 637, 29
- [8] Bergbusch, P. A., Vandenberg, D. A., 1992, ApJS, 81, 163
- [9] Binzel, R. P., Farinella, P., Zappala, V., és mksai, 1989, Asteroid rotation rates - Distributions and statistics. In: Asteroids II, ed. R.P. Binzel, T. Gehrels, & M.S. Matthews, Univ. Arizona Press, 416-441
- [10] Bolte, M. J., 1986, BAAS, 18, 1037
- [11] Bolte, M. J., 1987, ApJ, 315, 469
- [12] Bellazzini, M., Pecci, F. F., Ferraro, F. R., és mksai, 2001, AJ, 122, 2569
- [13] Binney, J., Tremaine, S., 1987, Galactic dynamics, Princeton University Press
- [14] Breger, M., Stich, J., Garrido, R., és mksai, 1993, A&A, 271, 482
- [15] Breger, M., Lenz, P., Antoci, V., és mksai, 2005, A&A, 435, 955
- [16] Brinsfield, J. W., 2008, 2008, MPBu, 35, 86
- [17] Cacciari, C., Corwin, T. M., Carney, B. W., 2005, AJ, 129, 267
- [18] Caldwell, J. A. R., Ostriker, J. P., 1981, ApJ, 251, 61
- [19] Caldwell, S. P., Dickens, R. J., 1988, MNRAS, 234, 87
- [20] Carraro, G., Lia, C., 2000, A&A, 357, 977
- [21] Carraro, G., Zinn, R., Moni Bidin, C., 2007, A&A, 466, 181
- [22] Castellani, M., Caputo, F., Castellani, V., 2003, A&A, 410, 871

- [23] Catelan, M., Bellazzini, M., Landsman, W. B., és mktsai, 2001, AJ, 122, 3171
- [24] Cayrel de Strobel, G., Soubiran, C., Ralite, N., 2001, A&A, 373,159
- [25] Chaboyer, B, 2008, IAUS, 248, 440
- [26] Chadid, M., Wade, G. A., Shorlin, S. L. S., és mktsai, 2004, A&A, 413, 1087
- [27] Christiansen, J. L., Derekas, A., Ashley, M. C. B., és mktsai, 2007, MNRAS, 382, 239
- [28] Clement, C. M., Muzzin, A., Dufton, Q., és mktsai, 2001, AJ, 122, 2587
- [29] Clement, C. M., 2002, Catalogue of Variable Stars in Globular Clusters
<http://www.astro.utoronto.ca/~cclement/read.html>
- [30] Clement, C. M., Rowe, J., 2000, AJ, 120, 2579
- [31] Clementini, G., Corwin, T. M., Carney, B. W., és mktsai, 2004, AJ, 127, 938
- [32] Cole, A. A., Smecker-Hane, T. A., Tolstoy, E., és mktsai, 2004, MNRAS, 347, 367
- [33] Contreras, R., Catelan, M., Smith, H. A., és mktsai, 2005, ApJ, 623, 117
- [34] Côté, P., Welch, D. L., Fischer, P., és mktsai, 1995, AJ, 454, 788
- [35] Davidge, T. J., 2000, AJ, 120, 1853
- [36] Davies, M. B., Sigurdsson, S., 2001, MNRAS, 324, 612
- [37] De Angeli, F., Piotto, G., Cassisi, S., és mktsai, 2005, AJ, 130, 116
- [38] de Marchi, G., Pulone, L., Paresce, F., 2006, A&A, 449, 161
- [39] Demarque, P., Woo, J-H, Kim, Y-C, Yi, S. K., 2004, ApJS, 155, 667
- [40] Derekas, A., Kiss, L. L., Szabo, Gy. M., és mktsai, 2003b, IBVS Nr. 5479
- [41] Derekas, A., Kiss, L. L., Bedding, T. R., és mktsai, 2009, MNRAS, 394, 995
- [42] Djorgovski, S., King, I. R., 1986, ApJ, 305, 61
- [43] Drukier, G. A., Cohn, H. N. Lugger, P. M., és mktsai, 1996, AAS, 189, 7113
- [44] Drukier, G.A., Slavin, S. D., Cohn, H. N., és mktsai, 1998, AJ, 115, 708
- [45] Dugan, R.S., 1923, ApJ, 58, 164
- [46] Durech, J., Vokrouhlický, D., Kaasalainen, M., és mktsai, 2008, A&A, 489, 25

- [47] Einsel, C., Spurzem, R., 1997, *IAUJD*, 15, 22
- [48] ESA, 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA-SP 1200
- [49] Fellhauer, M., Evans, N. W., Belokurov, V., és mktsai, 2008, *MNRAS*, 381, 749
- [50] Fischer, P., Welch, D. L., Mateo, M., és mktsai, 1993, *AJ*, 106, 1508
- [51] Fouqué, P., Arriagada, P., Storm, J., és mktsai, 2007, *A&A*, 476, 73
- [52] Fulchignoni, M., Barucci, M. A., Di Martino, M., és mktsai, 1995, *A&A*, 299, 929
- [53] Fusi Pecci, F., Ferraro, F. R., Bellazzini, M., 1993, *AJ*, 105, 1145
- [54] Giuricin, G., Mardirossian, F., 1981, *A&AS*, 45, 85
- [55] Gnedin, O. Y., Ostriker, J. P., 1997, *ApJ*, 474, 223
- [56] Gratton, R. G., Bragaglia, A., Carretta, E., és mktsai, 2003, *A&A*, 408, 529
- [57] Grillmair, C. J., 1998, *ASPC*, 136, 45
- [58] Grillmair, C. J., Johnson, R., 2006, *ApJ*, 639, 17
- [59] Gunn, J. E., Griffin, R. F., 1979, 1979, *AJ*, 84, 752
- [60] Harris, W.E., 1982, *ApJS*, 50, 573
- [61] Harris, W. E., 1996, *AJ*, 112, 1487
<http://physwww.physics.mcmaster.ca/%7Eharris/mwgc.dat>
- [62] Harris, A. W., 1997, „Minor Planet Lightcurve Parameters”
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/LightcurveDat.html>
- [63] Hintz, E. G., Bush, T. C., Rose, M. B., 2005, *AJ*, 130, 2876
- [64] Hurta, Zs., Jurcsik, J., Szeidl, B., Sódor, Á., 2008, *AJ*, 135, 957
- [65] Ivans, I. I., Kraft, R. P., 2007, *AAS*, 38, 959
- [66] Jurcsik, J., 1995, *AcA*, 45, 653
- [67] Jurcsik, J., Kovács, G., 1996, *A&A*, 312, 111
- [68] Jurcsik, J., 1998, *A&A*, 333, 571
- [69] Jurcsik, J., Sódor, Á., Váradi, M., 2005, *A&A*, 430, 1049
- [70] Jurcsik, J., Szeidl, B., Sódor, Á., és mktsai, 2006, *AJ*, 132, 61

- [71] Jurcsik, J., Sódor, Á., Hurta, Zs., és mktsai, 2008, MNRAS, 391, 164
- [72] Jurcsik, J., Sódor, Á., Szeidl, B., és mktsai, 2009, MNRAS, 393, 1553
- [73] Jurcsik, J., Hurta, Zs., Sódor, Á., és mktsai, 2009, eprint arXiv:0904.4129
- [74] Kaluzny, J., Thompson, I. B., Krzeminski, W., és mktsai, 2005, AIPC, 752, 70
- [75] Kaluzny, J., Olech, A., Stanek, K. Z., 2001, AJ, 121, 1533
- [76] Kim, S.-L., Lee, J.W., Kwon, S.-G., és mktsai 2003, A&A, 405, 231
- [77] King, I. R., 1962, AJ, 67, 471
- [78] King, I. R., 1965, AJ, 70, 376
- [79] King, I. R., 1966, AJ, 71, 64
- [80] Kiss, L. L., Szabó, Gy., Sárneczky, K., 1999, A&AS, 140, 21
- [81] Kiss, L. L., Székely, P., Bedding, T. R., és mktsai, 2007, ApJ, 659, L129
- [82] Kiss, L. L., 2002, IBVS Nr. 5355
- [83] Kovács, G., Jurcsik, J., 1996, ApJ, 466, 17
- [84] Kovács, G., Jurcsik, J., 1997, A&A, 322, 218
- [85] Kovács, G., 1998, Mem. Soc. Astron. Italiana, 69, 49
- [86] Kovács, G., 2001, Stellar pulsation - nonlinear studies, ed. Takeuti, M., Sasselov, D. D., Astrophys. & Space Sci. Lib., 257, 61 (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-6818-5)
- [87] Kreiner, J.M., Kim, C.-H., Nha, I.-S., 2001, An Atlas of O–C Diagrams of Eclipsing Binary Stars, Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej
- [88] Lafler, J., Kinman, T. D., 1965, ApJS, 11, 216
- [89] Landolt, A. U., 1992, AJ, 104, 340
- [90] Lecrone, C., Duncan, A., Hudson, E., és mktsai, 2006, MPBu, 33, 66
- [91] Lee, K. H., Lee, H. M., Sung, H., 2006, MNRAS, 367, 646
- [92] Lee, Y.-W., 1990, ApJ, 363, 159
- [93] Lee, M. G., Park, H. S., Kim, E., és mktsai, 2008, ApJ, 682, 135
- [94] Lee, Y.-W., Joo, J.-M., Sohn, Y.-J., és mktsai, 1999, Nature, 402, 55

- [95] Lee, C. W., Lee, H. M., Ann, H. B., 1999, *ApJ*, 513, 242
- [96] Lee, H. M., Goodman, J., 1995, *ApJ*, 1995, 443, 109
- [97] Lenz, P., Breger, M., 2005, *CoAst*, 145, 53
- [98] Leon, S., Meylan, G., Combes, F., 2000, *A&A*, 359, 907
- [99] Mackey, A. P., Gilmore, G. F., 2004, *MNRAS*, 355, 504
- [100] Mallama, A.D., 1980, *ApJS*, 44, 241
- [101] Marino, A. F., Villanova, S., Piotto, G., és mktsai, 2008, *A&A*, 490, 625
- [102] Marks, M., Kroupa, P., Baumgardt, H., 2008, *MNRAS*, 386, 2047
- [103] Meylan, G., Mayor, M., 1986, *A&A*, 166, 122
- [104] Meylan, G., Heggie, D. C., 1997, *A&ARv*, 8, 1
- [105] Meylan, G., 1987, *A&A*, 184, 144
- [106] Meyssonnier, N. Azzopardi, M., 1993, *A&AS*, 102, 451
- [107] Milgrom, M., 1983, *ApJ*, 270, 365
- [108] Milone, A. P., Bedin, L. R., Piotto, G., 2008, *ApJ*, 673, 241
- [109] Monella R., 1985, *Coelum LIII*, 287
- [110] Montuori, M., Capuzzo Dolcetta R., Di Matteo P., és mktsai, 2008, *ASPC*, 390, 394
- [111] Montuori, M., Capuzzo-Dolcetta, R., Di Matteo, P., és mktsai, 2007, *ApJ*, 659, 1212
- [112] Morbidelli, A., Jedicke, R., Bottke, W. F., és mktsai, 2002, *Icarus*, 158, 329
- [113] Morgan, D. H., Hatzidimitriou, D., 1995, *A&AS*, 113, 539
- [114] Morgan, S. M., Wahl, J. N., Wieckhorst, R. M., 2005, *MNRAS*, 374, 1421
- [115] Mothé-Diniz, T., Nesvorný, D., 2008, *A&A*, 492, 593
- [116] Munari, U., Sordo, R., Castelli, F., és mktsai, 2005, *A&A*, 442, 1127
- [117] Nesvorny, D., Vokrouhlicky, D.; Bottke, W. F., 2006, *Science*, 312, 1490
- [118] Norris, J. E., Freeman, K. C.; Mighell, K. J., 1996, *ApJ*, 462, 241

- [119] Odenkirchen, M., Grebel, E. K., Rockosi, C. M., és mktsai, 2001, *ApJ*, 548, L165
- [120] Odenkirchen, M., Grebel, E. K., Dehnen, W., és mktsai, 2003, *AJ*, 126, 2385
- [121] Olsen, K. A. G., Salyk, C., 2002, *AJ*, 124, 2045
- [122] Oosterhoff, P. Th., 1939, *Observatory*, 62, 104
- [123] Ostriker, J. P., Spitzer, L., Chevalier, R. A., 1972, *ApJ*, 176, 51
- [124] Pancino, E., Galfo, A., Ferraro, F. R., és mktsai, 2007, *ApJ*, 661, 155
- [125] Pancino, E., Seleznev, A., Ferraro, F. R., és mktsai, 2003, *MNRAS*, 345, 683
- [126] Peterson, R. C., Seitzer, P., Cudworth, K. M., 1989, *ApJ*, 347, 251
- [127] Piotto, G., Bedin, L. R., Anderson, J., és mktsai, 2007, *ApJ*, 661, 53
- [128] Poretti, E. 2001, *A&A*, 371, 986
- [129] Pravec, P., Harris, A. W., 2000, *Icarus*, 148, 12
- [130] Pravec, P., Harris, A. W., Scheirich, P., és mktsai, 2005, *Icarus*, 173, 108
- [131] Rakos, K., Schombert, J., 2005, *PASP*, 117, 245
- [132] Recio-Blanco, A., Aparicio, A., Piotto, G., 2006, *A&A*, 452, 875
- [133] Robinson, L. E., Warner, B. D., 2002, *MPBu*, 29, 6
- [134] Rodríguez, E., Rolland, A., López de Coca, P., Martín, S. 1996, *A&A*, 307, 539
- [135] Rodríguez, E., López-González, M.J., López de Coca, P., 2000, *A&AS*, 144, 469
- [136] Rodríguez, E., Breger, M., 2001, *A&A*, 366, 178
- [137] Rosenberg, A., Saviane, I., Piotto, G., és mktsai, 1999, *AJ*, 118, 2306
- [138] Rucinski, S. M., 1993, *PASP*, 105, 1433
- [139] Samus, N. N., Durlevich, O. V., és mktsai, Combined General Catalogue of Variable Stars, *VizieR On-line Data Catalog: II/250*
- [140] Savage, B., Mathis, J., 1979, *ARA&A*, 17, 73
- [141] Siegel, M., Sarajedini, A., Chaboyer, B., és mktsai, 2008, *ASPC*, 393, 271
- [142] Sawyer, H. B., Harvard College Observatory Circular, 366, 1
- [143] Sárneczky, K., Szabó, Gy., Kiss, L. L., 1999, *A&AS*, 137, 363

- [144] Scarpa, R., Marconi, G., Gilmozzi, R., és mktsai, 2007, A&A, 462, L9
- [145] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., Davis, M., 1998, ApJ, 500, 525
- [146] Sharpee, B., Stark, M., Pritzl, B., és mktsai, 2002, AJ, 123, 321
- [147] Sheridan, E. E., 2002, MPBu, 29, 32
- [148] Shetrone, M. D., Keane, M. J., 2000, AJ, 119, 840
- [149] Simon, N. R., Teays, T. J., 1982, ApJ, 261, 586
- [150] Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., és mktsai, 2006, AJ, 131, 1163
- [151] Soszynski, I., Udalski, A., Szymanski, M., és mktsai 2003, AcA, 53, 93
- [152] Soydugan, E., Soydugan, F., Demircan, O., és mktsai, 2006, MNRAS, 370, 2013
- [153] Sódor, Á., Vida, K., Jurcsik, J., 2006, IBVS, 5705, 1
- [154] Sódor, Á., Szeidl, B., Jurcsik, J., 2007, A&A, 469, 1033
- [155] Sperl, M., 1998, Comm. Astr. Seis., 111
- [156] Spitzer, L. Jr., Thuan, T. X., 1972, ApJ, 175, 31
- [157] Spitzer, L. Jr., 1987, Dynamical evolution of globular clusters, Princeton University Press, 1987, 191 p.
- [158] Spitzer, L. Jr., Hart, M. H., 1971, ApJ, 166, 483
- [159] Stanford, L. M., Da Costa, G. S., Norris, J. E., és mktsai, 2006, ApJ, 647, 1075
- [160] Stellingwerf, R. F., 1978, ApJ, 224, 953
- [161] Stephens, R. D., 2001, MPBu, 28, 28
- [162] Stephens, R. D., Warner, B., Pravec, P., és mktsai, 2002, MPBu, 29, 41
- [163] Stephens, R. D., 2002, MPBu, 29, 2
- [164] Szabó, Gy. M., Csák, B., Sárneczky, K., és mktsai, 2001, A&A, 375, 285
- [165] Takato, N., 2008, ApJ, 685, 161
- [166] Udalski A., Szymanski M., Kaluzny J., és mktsai, 1992, Acta Astron., 42, 253
- [167] Udalski, A., Soszynski, I., Szymanski, M. és mktsai, 1999, AcA, 49, 437
- [168] Valenti, E., Ferraro, F. R., Origlia, L., 2004, MNRAS, 351, 1204

- [169] Villanova, S., Piotto, G, King, I. R., és mktsai, 2007, ApJ, 663, 296
- [170] Wallerstein, G., 2002, PASP, 114, 689
- [171] Walter, K., 1983, A&A, 128, 391
- [172] Wang, X. B., 2003. Abstracts of Photometry and Polarimetry of Asteroids: Impact on Collaboration, Kharkiv, 32
- [173] Wang, X. B., Zhang, X. L., Gu, S. H., 2005, EM&P, 97, 233
- [174] Warner, B. D., 2005, MPBu, 32, 4
- [175] Warner, B. D., 2006, MPBu, 33, 58
- [176] Willems, B., Aerts, C., 2002, A&A, 384, 441
- [177] Wisniewski, W.Z., Michałowski, T.M., Harris, A.W., és mktsai, 1997, Icarus, 126, 395
- [178] Zavala, R.T., McNamara, B.J., Harrison, T.E., és mktsai, 2002, AJ, 123, 345
- [179] Zhou, A.-Y., Fu, J.-N., Delta Scuti Star Newsletter, Nr.12, July 1998.
http://www.astro.univie.ac.at/~dsn/dssn/nl12/chapter_12.html
- [180] Zinn, R., West, M. J., 1984, ApJS, 55, 45

11. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőimnek, Dr. Kiss Lászlónak és Dr. Szatmáry Károlynak az elmúlt években nyújtott felbecsülhetetlen szakmai és emberi támogatásukért, valamint a kutatásaimhoz szükséges anyagi fedezet előteremtéséért.

Köszönöm a Szegedi Tudományegyetem Fizikus Tanszékcsoport csillagász végzett-ségű munkatársainak a technikai segítséget, különösképpen Csák Baláznak.

Köszönet illeti közeli és távolabbi munkatársaimat, akik lehetővé tették az általuk irányított szakmai munkákban való részvételt.

Családomnak (Mauz, Tutyi, Miff) is köszönöm azt a türelmet, amellyel segítették ezen értekezés megszületését.

Köszönöm számos obszervatórium munkatársainak - de legfőképp az Angol-Ausztrál és az MTA KTM CSKI pizskéstetői obszervatóriuma dolgozóinak - a lehetőséget, hogy elvégezhettem a dolgozatomban ismertetett eredményekhez szükséges távcsöves méréseket.

A dolgozatban bemutatott eredményeket a következő ösztöndíjak, pályázatok támogatták anyagilag:

FKFP 0010/2001

OTKA F043203

OTKA T042509

OTKA K76816

Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj